



**İSTANBUL ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**ÜSTÜN ÜÇÜNCÜ NESİL GEZGİN İLETİŞİM  
SİSTEMLERİNE YÖNELİK İLERİ SİNYAL İŞLEME  
ALGORİTMALARININ GELİŞTİRİLMESİ**

**Sibel TOMBAZ  
Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Danışman  
Prof. Dr. Hakan Ali ÇIRPAN**

**Ocak, 2009**

**İSTANBUL**



**İSTANBUL ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**ÜSTÜN ÜÇÜNCÜ NESİL GEZGİN İLETİŞİM  
SİSTEMLERİNE YÖNELİK İLERİ SİNYAL İŞLEME  
ALGORİTMALARININ GELİŞTİRİLMESİ**

**Sibel TOMBAZ  
Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı**

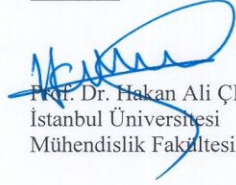
**Danışman  
Prof. Dr. Hakan Ali ÇIRPAN**

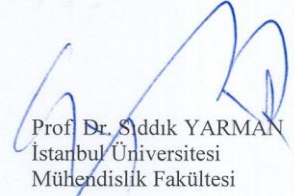
**Ocak, 2009**

**İSTANBUL**

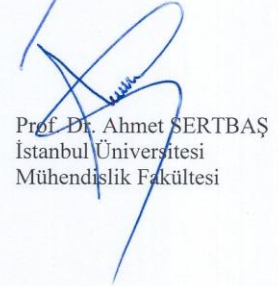
Bu çalışma 12/01/ 2009 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Elektrik-elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Tez Jürisi

  
Prof. Dr. Hakan Ali ÇIRPAN (Danışman)  
İstanbul Üniversitesi  
Mühendislik Fakültesi

  
Prof. Dr. Sıddık YARMAN  
İstanbul Üniversitesi  
Mühendislik Fakültesi

  
Prof. Dr. Aydın AKAN  
İstanbul Üniversitesi  
Mühendislik Fakültesi

  
Prof. Dr. Ahmet SERTBAŞ  
İstanbul Üniversitesi  
Mühendislik Fakültesi

  
Doç. Dr. Halim ZAİM  
İstanbul Üniversitesi  
Mühendislik Fakültesi

## ÖNSÖZ

Beni yüksek lisans yapmaya yönlendiren, çalışmalarım sırasında desteğini bir gün olsun esirgemeyen değerli hocam Prof. Dr. Hakan Ali Çırpan'a minneti bir borç bilirim. En az danışmanım kadar tezimin şekillenmesinde yardımcı olan, bu anlamda Güney Florida Üniversitesi'nde Kablosuz Haberleşme ve Sinyal İşleme grubunda tez çalışmalarım için bulunmamı sağlayan ve beni her zaman cesaretlendiren değerli hocam Doç. Dr. Hüseyin Arslan'a özel teşekkürlerimi sunarım.

Kablosuz Haberleşme ve Sinyal İşleme grubunda bulunduğum sürece birlikte çalışma şansına sahip olduğum Dr. İsmail Güvenç ve Mustafa Emin Şahin'e, bana karşı olan anlayışlı, sabırlı ve yardımsever tavırlarından dolayı teşekkür ederim. Onlar olmasaydı ben bu çalışmanın altından kalkamazdım. Bu anlamda tanıma fırsatı bulduğum tüm Kablosuz Haberleşme ve Sinyal İşleme grubunda olan arkadaşlarıma, verdikleri destek dolayısıyla teşekkür ederim.

Lisans ve yüksek lisans eğitimim boyunca bana burs desteği sağlayan Türk Eğitim Vakfı ve değerli yöneticilerine, ayrıca yurt dışında araştırmacı olarak bulunmamı maddi olarak destekleyen Türk Milli Kültür Vakfı ve Petrol Vakfı'na minnetlerimi sunarım.

Son olarak en büyük destekçim olan canım annem ve babama, dünyanın en tatlı kardeşleri olan Tuğçe ve Onur'a ve ailemin tüm fertlerine, onlara sahip olduğum için ne kadar şanslı olduğumu bildirmek ve en büyük teşekkürlerimi sunmak isterim.

**Ocak, 2009**

**Sibel TOMBAZ**

# İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ .....	I
İÇİNDEKİLER.....	II
ŞEKİL LİSTESİ.....	IV
TABLO LİSTESİ.....	VI
SEMBOL LİSTESİ.....	VII
ÖZET .....	IX
SUMMARY .....	X
1. GİRİŞ .....	1
2. GENEL KISIMLAR.....	6
2.1. ÜSTÜN ÜÇÜNCÜ NESİL GEZGİN İLETİŞİM SİSTEMLERİ .....	6
2.2. OFDM'E GENEL BAKIŞ.....	8
2.2.1. Sistem Modeli .....	9
2.2.2. OFDM Sembolünün Önek ile Genişletilmesi.....	11
2.2.3. Kablosuz Kanal .....	12
2.2.4. OFDM Sistemi .....	15
2.2.5. OFDM Dezavantajları .....	16
2.2.5.1. Frekans Kayması.....	16
2.2.5.2. Zaman Kayması.....	16
2.3. OFDMA'E GENEL BAKIŞ.....	19
2.4. OFDM TABANLI SİSTEMLERDE ZAMAN SENKRONİZASYON PROBLEMİ.....	21
2.4.1. Sinyal Modeli .....	22
2.4.2. OFDM Sistemleri için Gözü Kapalı Zamanlama Senkronizasyonu Teknikleri.....	25
2.4.2.1. ML (En Büyük Olabilirlik) Metot.....	27
2.4.2.2. Muller Metodu.....	32
2.4.2.3. Speth Metot.....	32
2.4.2.4. Korelasyon Tabanlı Metot .....	33

<b>3. MALZEME VE YÖNTEM.....</b>	<b>34</b>
<b>3.1. PROBLEM TARİFİ .....</b>	<b>34</b>
<b>3.2. ÇOK KULLANICILI OFDMA SİSTEMLERİNDE ZAMANLAMA     SENKRONİZASYONU .....</b>	<b>35</b>
<b>3.3. MAKRO HÜCRE İLE FEMTO HÜCRE ARASINDAKİ SENKRONİZASYON..</b>	<b>38</b>
<b>3.3.1. Sistem Modeli .....</b>	<b>38</b>
<b>3.3.1.1. Sinyal Modeli.....</b>	<b>40</b>
<b>3.3.1.2. Femto hücre ile Makro hücre sistemleri arasındaki Eşzamanlamanın Etkisi             .....</b>	<b>41</b>
<b>3.3.2. Çok Kullanıcı Senaryoda RMSE'nin Teorik Olarak Türetilmesi.....</b>	<b>43</b>
<b>3.3.2.1. Korelasyon Metriğinin İstatistiği.....</b>	<b>43</b>
<b>3.3.2.2. Ortalama Karesel Hata (MSE) için Bir Yaklaşım .....</b>	<b>45</b>
<b>3.3.3. Korelasyon Metriğinin Çok-Kullanıcı Senaryo için Geliştirilmesi.....</b>	<b>46</b>
<b>4. BULGULAR.....</b>	<b>49</b>
<b>4.1. TEK KULLANICILI OFDM SİSTEMLERİNDEKİ GÖZÜ KAPALI     SENKRONİZASYON METOTLARIN PERFORMANSLARI .....</b>	<b>50</b>
<b>4.1.1 RMSE Analizi .....</b>	<b>50</b>
<b>4.1.2. CP Etkisi .....</b>	<b>51</b>
<b>4.1.3. Alt-taşıyıcı Sayısı Etkisi .....</b>	<b>52</b>
<b>4.1.4 Senkronizasyon Tekniklerinin Ortalama Alma Yöntemi ile Performansının         Arttırılması .....</b>	<b>55</b>
<b>4.2 MACRO HÜCRE İLE FEMTO HÜCRE ARASINDAKİ ZAMANLAMA     SENKRONİZASYONU .....</b>	<b>61</b>
<b>5. TARTIŞMA VE SONUÇ .....</b>	<b>67</b>
<b>KAYNAKLAR .....</b>	<b>68</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ.....</b>	<b>70</b>

## ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1	: İletilen OFDM sembolünün güç spektral yoğunluğu .....	10
Şekil 2.2	: Yan kısımlardaki ve DC'deki alt-taşıyıcılar sıfırlandığında elde edilen OFDM sinyalinin güç spektral yoğunluğu .....	11
Şekil 2.3	: OFDM sembolünün önek ile genişletilmesi.....	12
Şekil 2.4	: Çok yollu kanal etkisinin gösterimi .....	13
Şekil 2.5	: ISI oluşumu .....	14
Şekil 2.6	: OFDM'de verilerin paralel iletimini ifade eden gösterim .....	14
Şekil 2.7	: OFDM alıcı-verici blok diagramı .....	15
Şekil 2.8	: Zaman kaymasının yıldız diagramı üzerindeki etkisi.....	19
Şekil 2.9	: OFDM ve OFDMA'de alt-taşıyıcıların tahsis edilmesinin karşılaştırılması .....	20
Şekil 2.10	: OFDM ve OFDMA'de UL yapısı .....	21
Şekil 2.11	: ISI ve ICI'dan kaçınmak için zaman kayması gereksinimi .....	22
Şekil 2.12	: CP uzunluğu 10 olan bir OFDM sisteminde, zaman kayması 1(solda) ve 25(sağda) olduğu durumda 16-QAM yıldız diagramındaki değişim .....	22
Şekil 2.13	: Bir OFDM Sistemi .....	23
Şekil 2.14	: OFDM sisteminin eşdeğer modeli .....	23
Şekil 2.15	: Korelasyon fonksiyonunun elde edilişi .....	26
Şekil 2.16	: OFDM sinyalinin yapısı .....	27
Şekil 2.17	: Olabilirliğin logaritması fonksiyonu .....	32
Şekil 2.18	: Metriklerin üst üste çizdirilmesi .....	33
Şekil 3.1	: UL'de haberleşme yapan OFDMA tabanlı makro hücre sistemi .....	36
Şekil 3.2	: OFDMA Veri Yapısı.....	37
Şekil 3.3	: Farklı mMS'lerden gelen sinyaller, fBS'a farklı gecikmelerle varması.....	39
Şekil 3.4	: Zaman domeni sunumu .....	40
Şekil 3.5	: ICI etkisi .....	42
Şekil 3.6	: Yeni korelasyon metriği hesabı gösterimi .....	46
Şekil 4.1	: Gözü kapalı metotlar için RMSE analizleri .....	50
Şekil 4.2	: CP uzunluğunun ML metot üzerine etkisi.....	51
Şekil 4.3	: Taşıyıcı sayısının, sinyalin otokorelasyon fonksiyonuna olan etkisi .....	53
Şekil 4.4	: Alt-taşıyıcı sayısının ML metodu üzerine etkisi .....	54
Şekil 4.5	: Zaman kayması 30 olan kullanıcı sinyaline ait korelasyon metriği.....	55
Şekil 4.6	: Korelasyon metriğinin periyodikliği .....	56
Şekil 4.7	: 5 sembol üzerinden ortalama almanın korelasyon metriği üzerine etkisi.....	57
Şekil 4.8	: 99 sembol üzerinden ortalama almanın korelasyon metriği üzerine etkisi....	58
Şekil 4.9	: Farklı sembol sayıları üzerinden ortalama almanın etkisi.....	59
Şekil 4.10	: Ortalama almanın CP uzunluğu üzerine etkisi .....	59
Şekil 4.11	: Ortalama almanın sistem performansına etkisi .....	60
Şekil 4.12	: Gecikmesi 32 örnek olan kullanıcıya ait korelasyon metriği .....	61
Şekil 4.13	: Üç kullanıcı senaryoda elde edilen korelasyon metriği .....	62

<b>Şekil 4.14</b>	: Üç kullanıcıli senaryoda, modifiye edilen korelasyon metriği.....	63
<b>Şekil 4.15</b>	: Çok kullanıcıli senaryoda önerilen metotun farklı pencere aralıkları için RMSE performansları .....	64
<b>Şekil 4.16</b>	: $D_{max}=0$ için korelasyon metriğinin ortalaması ve varyansı .....	65
<b>Şekil 4.17</b>	: $D_{max}=23$ için korelasyon metriğinin ortalaması ve varyansı .....	65

## **TABLO LİSTESİ**

<b>Tablo 2.1</b>	<b>: 3GPP Sürümleri.....</b>	<b>7</b>
------------------	------------------------------	----------

## SEMBOL LİSTESİ

<b>3G</b>	: üçüncü nesil
<b>4G</b>	: dördüncü nesil
<b>3G LTE</b>	: üçüncü nesil uzun dönemli evrim-üstün üçüncü nesil
<b>WCDMA</b>	: geniş bantlı kod bölüşümlü çoklu erişim
<b>OFDM</b>	: ortogonal frekans bölüşümlü modülasyon
<b>OFDMA</b>	: ortogonal frekans bölüşümlü çoklu erişim
<b>SC-FDMA</b>	: tek taşıyıcı frekans bölüşümlü çoklu erişim
<b>FDMA</b>	: frekans bölüşümlü çoklu erişim
<b>ISI</b>	: semboller arası girişim
<b>CP</b>	: çevrimsel önek
<b>ML</b>	: en büyük olabilirlik
<b>DL</b>	: aşağı bağlantı
<b>UL</b>	: yukarı bağlantı
<b>DSL</b>	: sayısal abone hattı
<b>mMS</b>	: makro hücre mobil istasyonları
<b>fBS</b>	: femto hücre baz istasyonu
<b>RMSE</b>	: ortalama karesel hatanın karakökü
<b>UMTS</b>	: uluslararası gezgin iletişim sistemleri
<b>WCIS</b>	: dünya hücresel bilgi servisi
<b>VoIP</b>	: internet protokolü üzerinden ses geçiti
<b>IP</b>	: internet protokolü
<b>GSM</b>	: mobil haberleşme için global sistem
<b>3GPP</b>	: üçüncü nesil ortaklık projesi
<b>HSPA</b>	: yüksek hızlı paket erişimi
<b>HSDPA</b>	: yüksek hızlı aşağı bağlantı paket erişimi
<b>HSUPA</b>	: yüksek hızlı yukarı bağlantı paket erişimi
<b>Mbps</b>	: saniyedeki mega bit sayısı
<b>QAM</b>	: dördün genlik kiplenimi
<b>MIMO</b>	: çok girdili-çok çıktılı sistem
<b>DAB</b>	: sayısal ses yayılımı
<b>DVB</b>	: sayısal video yayılımı
<b>WLAN</b>	: telsiz yerel alan ağı
<b>DFT</b>	: ayrık fourier dönüşümü
<b>IDFT</b>	: ters ayrık fourier dönüşümü
<b>BPSK</b>	: ikili faz kaydırmalı kipleme
<b>QPSK</b>	: dördün faz kaydırmalı kiplenim
<b>D/A</b>	: sayısal analog çevirici
<b>A/D</b>	: sanalog sayısal çevirici
<b>DC</b>	: doğru akım
<b>BER</b>	: bit hata oranı
<b>FFT</b>	: hızlı fourier dönüşümü

<b>PAPR</b>	: g¼c¼n uç değerinin ortalama değerine oranı
<b>ICI</b>	: taşıyıcılar arası girişim
<b>NLOS</b>	: direk olmayan görüş hattı
<b>AWGN</b>	: toplanır gauss beyaz g¼r¼lt¼s¼
<b>MMSE</b>	: en k¼¼k ortalama karesel hata
<b>SNR</b>	: işaret g¼r¼lt¼ oranı
<b>mBS</b>	: makro h¼cre baz istasyonu
<b>ICI</b>	: taşıyıcılar arası girişim
<b>NLOS</b>	: direk olmayan görüş hattı

## ÖZET

### ÜSTÜN ÜÇÜNCÜ NESİL GEZGİN İLETİŞİM SİSTEMLERİNE YÖNELİK İLERİ SİNYAL İŞLEME ALGORİTMALARININ GELİŞTİRİLMESİ

Bu çalışmada, üstün üçüncü nesil gezgin sistemler ele alınmıştır. OFDM tabanlı olmaları sebebiyle senkronizasyon hatalarına karşı, tek taşıyıcılı sistemlere göre daha duyarlı olan bu sistemlerde, çok kullanıcı senaryoda zamanlama senkronizasyonu problemi incelenmiştir.

Ele alınan problemde, fiziksel katmanlarında OFDMA kullanan iki kablosuz haberleşme sistemi ele alınmaktadır. Bu sistemlerden bir tanesi makro hücre, diğeri ise makro hücre sisteminin uygun spektrum fırsatlarını kullanan femto hücre sistemidir. Bu amaçla femto hücre sistemi, diğeri sistemin UL'ine hava yolu üzerinden gözü kapalı olarak senkronize olmak zorundadır. Bu probleme yönelik olarak, tek kullanıcı senaryo için mevcut olan gözü kapalı senkronizasyon metodlarında kullanılan korelasyon aralığının artırılarak, performansının geliştirilmesi önerilmiştir.

Tezi genel olarak iki bölümde oluşmuş gibi düşünebiliriz. Birinci bölümde, genel anlamda üstün üçüncü nesil gezgin iletişim sistemleri ve OFDM teknolojisi ile ilgili bilgi verilmiş, OFDM'in avantajları ve dezavantajları anlatılmış ve senkronizasyon problemi için ön-eke dayalı gözü kapalı yöntemler incelenmiştir. Bu yöntemlerin performans karşılaştırılması yapılmış, bu tezde önerilen ortalama alma yöntemi ile performanslarının artırıldığı simülasyonlar ile gösterilmiştir.

İkinci bölümde ise, tezin ana konusu olan femto hücre ile makro hücre arasındaki zamanlama senkronizasyonu problemi ele alınmış, bu problemin önemi ve femto hücreye etkisi anlatılmıştır. Var olan gözü kapalı tekniklerin, probleme uygun hale getirilmesi ile oluşturulan yeni yöntem için, hata analizi matematiksel olarak gerçekleştirilmiş, bu iyileştirilme bilgisayar simülasyonları ile gösterilmiştir.

## **SUMMARY**

### **DEVELOPMENT OF ADVANCED SIGNAL PROCESSING ALGORITHMS FOR SUPER THIRD GENERATION SYSTEMS**

In this study, super third generation systems are handled. Because of, this systems are OFDM based, they are more sensitive to synchronization errors than single carrier systems. So the timing synchronization problem is presented and found a new method or this problem.

We consider two cognitive wireless networks both of which utilize orthogonal frequency division multiple access (OFDMA) in their physical layers. One of these networks (e.g., a femtocell network) utilizes the spectrum opportunities available in the other wireless network (e.g., a macrocell network). For this purpose, the former network needs to blindly synchronize to the uplink of the latter network over the air. We propose an improvement on the existing blind synchronization techniques in such a scenario by extending the correlation window length.

This thesis is separated in two parts. In the first part, super third generation systems and OFDM technology is discussed generally. Advantage and disadvantage of OFDM systems are given and CP based blind synchronization methods for single user scenario is studied. Performance comparison of these methods is done and performance improvement with averaging methods is shown with computer simulations.

On the other hand, the timing synchronization problem between femtocell and macrocell is handled in of second part and the importance of problem and affects to femtocell is discussed. Blind time synhronization methods for single user scenario is improved for this problem and the RMSE analysis and computer simulations are given.

## 1. GİRİŞ

Kablosuz teknolojilerin gelişmesi ile birlikte, yaygın mobil uygulamalara olan talepler artmıştır. 2008'in sonuna kadar dünya nüfusunun beşte birinin internete mobil telefonları aracılığıyla erişeceği beklenmektedir. Bu gelişmeler, kullanıcılara istediği zaman, istediği yerde birbiri ile haberleşme ve her türlü bilgiye ulaşma imkanı vermektedir. Gelecek kablosuz sistemler, yüksek hızda internet erişimi, video konferansı, gerçek zamanlı internet oyunları, akıllı evler, otomotikleşmiş otoyollar, gibi servisler sunacaktır. Fakat hala üstesinden gelinmesi gereken teknik problemler bulunmaktadır ve üçüncü nesil (3G) kablosuz sistemleri, gelecekteki bu yüksek performanslı multimedya uygulamalarını için gereksinimleri karşılayabilecek yeterlilikte değildir. Bu sebeple, mevcut 3G kablosuz sistemlerin özelliklerini geliştirme ihtiyacı doğmuş ve bu yeni sistem üstün üçüncü nesil sistemler veya 3G-Uzun Dönemli Evrim (3G LTE) adı verilmiştir. Dördüncü nesil (4G) sistemlerinin rahatça kurulmasına da olanak verecek olan bu sistem, 3G ve 4G arasında boşluğu doldurarak, mevcut sistemlerden yaralanarak operatör ve kullanıcıların ihtiyaçlarını karşılayacaktır. 3G sistemleri ile karşılaştırıldığında, üstün üçüncü nesil sistemleri, geliştirilmiş sinyal işleme algoritmaları ve teknolojiler, yeni hava arayüz katmanı, fiziksel katman değişiklikleri ve sistem yapısında köklü değişiklikler öngörmektedir. Üstün üçüncü nesil ve dördüncü nesil (4G) gibi yeni nesil kablosuz haberleşme sistemlerindeki en büyük yenilik, hava arayüzü olarak 3G sistemlerinde kullanılan geniş bantlı kod bölüşümlü çoklu erişim (WCDMA) yerine OFDM tabanlı OFDMA ve SC-FDMA'in seçilmiş olmasıdır ve 3G sistemlerine olan üstünlükleri de OFDM tabalı olmalarından kaynaklanmaktadır [1].

OFDM, çoklu-taşıyıcılı bir modülasyon şekli olup, haberleşmenin en büyük problemi olan kanaldaki çokyolluluk durumunda bile çok yüksek veri hızı ile haberleşmeyi mümkün kılmaktadır [2].

Çok-taşıyıcılı sistemlerde, iletim bandgenişliği, birden fazla dar bantlı alt-kanallara ayrılır ve veri bu paralel alt kanallar aracılığı ile eşzamanlı olarak iletilir. Alt kanallarda

iletilen bu verilerin, veri iletim hızı, tek bir kanal kullanıldığı duruma göre daha azdır yani sembol süreleri daha büyüktür. Tek bir kanaldan yapılan yüksek hızlı iletimde semboller birbirine daha yakın olup, kanalın çokyolluluk gecikmesinden dolayı birbiri üzerine binmekte ve semboller arası girişim (ISI) oluşmaktadır. Çok taşıyıcılı sistemlerde ise verinin çok-yollu kanal tarafından bozulması, düşük hızlardaki veri iletimi ile artan sembol uzunluğundan dolayı azaltılmıştır.

Çok-taşıyıcılı modülasyonun özel bir şekli olan OFDM’de, altkanallar (alttaşıyıcı frekansları), taşıyıcıların birbirine dik olacak bir şekilde seçilmiştir. Geleneksel frekans bölümlenmeli çoğullama yöntemlerinden farklı olarak, birbirine diksel olarak seçilen altkanallar ile, frekansların birbiri üzerine girmesine olanak sağlanmış bu da ek koruma bandlarına ihtiyaç kalmamıştır. Bu da spektral verimliliğin artmasını sağlamıştır. Ayrıca çok-yollu kanalların etkisini paralel iletim ile azaltan OFDM, bu sayede kompleks eşitleyicilerin kullanılmasına gerek duymamaktadır bu da alıcı karmaşıklığının önemli ölçüde azalmasını sağlamaktadır. OFDM sistemlerinde oluşan ISI, OFDM sembollerin sonuna CP (çevrimsel önek) eklenerek önlenmektedir. Eklenen önek, kanalın çok-yolluluk gecikmesinden büyük olduğu durumda, haberleşme ISI olmadan gerçekleşecektir [3].

OFDM sistemlerinin, çok-taşıyıcı olmasından kaynaklanan bu avantajlara rağmen, tek taşıyıcılı sistemlere göre sembol zamanlama ve frekans kaymasına göre daha duyarlıdır [4]. Bu duyarlılık sistem performansını önemli ölçüde etkileyebilmektedir. Bunu önlemek için, sembol zamanlama ve frekans kayması kesin olarak kestirilmesi ve alıcıda demodulasyondan önce kompanse edilmesi gerekmektedir. Bu çalışmada ele alınan uygulama için zamanlama kayması dikkate alınacağı için, frekans kaymasının kestiriminin öneminden ve bu konuda yapılan çalışmalardan bahsedilmeyecektir.

OFDM sistemlerinde, zamanlama kayması düzeltilme teknikleri genel olarak iki ana başlık altında toplanır. Birincisi veri destekli, diğeri ise gözü kapalı kestirim de olarak bilinen bilgiye dayalı olmayan yöntemdir [5]. Veri destekli yöntemler, zamanlama kaymasının kestirimi için, bilinen bir veri dizisi veya bir pilot sinyaline ihtiyaç duyarlar. Fakat bu yöntemde, kontrol kanalı vasıtasıyla gönderilen senkronizasyon sembolleri, sistemin veri hızını azaltmaktadır. Bu da, veri hızını megabitler seviyesine çıkarmayı hedefleyen yeni nesil haberleşme sistemleri için çözülmesi gereken bir problem olmuş ve pilot semboller kullanmaya gerek duymadan zamanlama kayması kestirimini yapan, gözü kapalı yöntemlerin üzerinde daha fazla durulmasına ve çalışma yapılmasına sebep

olmuştur. Gözü kapalı kestirim yöntemleri, alınan veriyi ve alınan sinyalin istatistiğinden oluşan ek bilgiyi kullanarak, senkronizasyon parametrelerini kestirmektedir [4].

Tek kullanıcılı OFDM sistemlerinde göz kapalı zamanlama kayması kestirimi ve senkronizasyonu üzerine uzun yıllardır çalışmalar yapılmış ve değişik metrikler kullanılmıştır. En popüler olan teknik, Beek tarafından [4] sunulmuş olan en büyük olasılırlık (Maximum-Likelihood-ML) metodudur. Kullanılan metrikler ile zamanlama kaymasının kesin olarak kestirilmek istenmesinin sebebinin, alıcıda elde edilen sinyalden verinin hatası en az olacak bir şekilde demodüle edilmesi olduğunu, akılda bulundurulmalıdır. Yani amaç iletilen verinin, alıcıda en az hata ile elde edilmesidir.

Bu çalışmada ele alınan problem, genel anlamda OFDM sistemlerinin genel problemi olan senkronizasyon ile ilgili olsa da, yapılan çalışmalar ile amaç bakımından farklılık göstermektedir. En büyük fark, zamanlama kayması kestiriminin yapılması gerektiği sistemin tek kullanıcılı değil de, çok kullanıcılı olması ve amacının, alıcıda elde edilen verilen bilginin demodüle edilmesi gerekmediğidir.

Üstün üçüncü nesil gezgin iletişim sistemlerinin OFDM tabanlı sistemler olduğu ve fiziksel katmanında WCDMA yerine OFDMA teknolojisinin kullanıldığı bahsedilmiştir. OFDMA, OFDM'in çok-kullanıcıli haberleşme senaryoları için geliştirilmiş şekli olup, OFDM ve FDMA'in birleşimi şeklinde düşünülebilir. Şöyle ki, OFDM'de, tek bir kullanıcıya ait verinin parçalanarak eş zamanlı olarak iletiildiği alt kanallardan, bu durumda birden fazla kullanıcıya ait veri eş zamanlı olarak gönderilir. Bu da yeni nesil haberleşme sistemlerinin, kullanıcılara yüksek hareket kabiliyeti sunma amacını yerine getirir. Fakat OFDMA de, OFDM gibi zamanlama kaymasına karşı önemli derecede duyarlıdır ve sistemin veri hızlarında sistem performansını önemli ölçüde etkiler [6].

Bu çalışmada çok kullanıcıli senaryoda zamanlama senkronizasyon problemi, baz istasyonundan kullanıcılara doğru veri iletimi yaparken (DL-aşağı link) oluşan zamanlama kaymasını değil, kullanıcılardan baz istasyonuna doğru (UL-yukarı link) veri iletimi yapılırken oluşan zamanlama kaymasını ele alır.

DL'de tek bir verici olup, bu da baz istasyonudur. Baz istasyonu ile haberleşmekte olan kullanıcılara baz istasyonu tarafından tek bir sinyal gönderilir. Bu bilgi tüm kullanıcılar tarafından alınır ve gerekli senkronizasyon parametreleri kestirildikten sonra, her kullanıcı kendine ait olan veri parçasını demodüle ederek, kendisine iletilen veriyi elde eder. Yani DL'deki zaman kayması parametresinin kestirimi, tek kullanıcıli OFDM

sistemlerinde olduğu gibidir çünkü elde edilen sinyal için tek bir zaman kayması değeri vardır ve literatürdeki tek kullanıcı sistemler için bulunan zamanlama senkronizasyon yöntemleri direkt olarak kullanılabilir. Buna karşılık UL'de, her kullanıcı kendine ait bilgiyi module ederek baz istasyonuna gönderir. Farklı kanallardan geçerek gelen her bir kullanıcıya ait sinyaller, farklı zamanlama kayması değerlerine sahip olup, bu şekilde baz istasyonu tarafından toplu olarak alınır. Yani UL senaryosunda kestirilmesi gereken birden fazla, farklı zamanlama kayması değerleri mevcuttur. UL'de senkronizasyonun daha zorlu olmasının bir diğer sebebi ise, DL'de bir kullanıcının zamanlama kaymasını yanlış kestirmesi, diğer kullanıcıları etkilemezken, UL'de baz istasyonuna ulaşan toplu sinyalden her bir kullanıcıya ait parametreler kestirilirken, bir kullanıcıya ait parametrenin yanlış kestirilmesi, diğer kullanıcıları da etkilemesidir. Bunun sonucunda, baz istasyonuna gelen sinyalden, kullanıcılara ait bilgiler doğru olarak çözülemeyecektir. Bu zorlukları sebebiyle, UL'de senkronizasyon problemi hala üzerinde çalışılmakta olan bir problemdir [6].

Tezde, ele alınan problem genel olarak çok kullanıcı OFDMA sistemlerinin UL kısmında zamanlama senkronizasyonunun yapılmasıdır. Daha önce de belirtildiği gibi, burada güdülen amaç, elde edilen sinyallerin demodule edilmesi ve iletilen bilginin en hatasız bir şekilde alınması değildir. Çalışmamızda ele alınan problem yeni nesil sistemlerle birlikte adı yavaş yavaş duyulmaya başlanan femto hücre yapısı üzerine olacaktır.

Yüksek veri hızları, azaltılmış gecikme süresi, artırılmış kapasite ve kapsama alanı hedefleyen yeni nesil gezgin iletişim sistemleri için, bu ihtiyaçları karşılamada en büyük rolün hücre boyutlarını küçültmek olduğu bilinmekte ve bu yöntem sık sık uygulanmaktadır. Fakat hücre boyutlarının küçültülmesi çok maliyetli bir işlemdir ve bu sebeple operatörler tarafından çok arzulanan bir çözüm değildir. Ev baz istasyonları adı verilen, femto hücre sistemi bu anlamda yeni bir gelişme olup, kısa menzilli, düşük güçlü ve en önemlisi, düşük maliyetli yapılardır. Kullanıcılar tarafından yüklenen bu yapı, sistem içinde daha iyi ses kalitesi ve veri iletişimi sağlamaktadır. Sesli görüşmelerinin %50'si, veri iletiminin ise %70'inin yapı içlerinde olduğu düşünülürse, sistem sağlayıcısına sayısal abone hattı (DSL) veya kablo ile bağlanan bu femto hücre sistemi, yapı içinde veri iletim performansının artırılması, operatörler için pahalı makro hücre yapılarındaki trafiğin azalması ve böylece sistemin gerçek mobil kullanıcılara daha iyi hizmet verilmesi sağlaması açısından büyük bir öneme sahiptir. Fakat, bu

sistemler için , makro hücreden ve diğer femto hücre'lerden gelen kanallar arası girişim (ICI) büyük bir problem oluşturmaktadır.

Özet olarak bu çalışmada, makro hücre sistem, ile birlikte bulunan ve onun kullanmadığı alt-taşıyıcı'ları kullanan OFDMA tabanlı femto hücre sistemi ele alınmıştır. Kullanılmayan alt-taşıyıcıları kullanabilmek için, femto hücre sistemi, makro hücre sistemine senkronize olmak zorundadır. Böylece diklik sağlanır ve makro hücre'den gelen girişim minimize edilir. Makro hücre mobile istasyonlardan(mMSs) gelen UL sinyalleri, femto hücre baz istasyonuna (fBS) farklı gecikmelerle gelebilirler Şahin ve dig. (2008)'de belirttiği gibi, mobil istasyonlardan gelen sinyaller, femto hücre kullanıcının çevrimsel önek dışında varırsa, bu durum büyük bir taşıyıcılar arası girişim (ICI) meydana getirir. Tezde, femto hücre sistemini etkileyen ICI'yi minimize edebilmenin, femto hücre sistemine ilk varan OFDMA sinyaline senkronize olmakla yani onun zamanlama kaymasının en doğru bir şekilde kestirilmesi ile mümkün olabileceğini gösterildi. Femto hücre sisteminin, makro hücre kullanıcıları ile direk haberleşme imkanının bulunmadığı bu senaryoda, femto hücre herhangi bir pilot sembol gönderemeyecek yani senkronizasyonu gözü kapalı bir şekilde yapması gerekecektir.

Tek kullanıcıli OFDM sistemlerinde gözü kapalı yöntemlerin çok çalışıldığı buna karşın çok-kullanıcıli için, bu konuda literatürde derinlemesine incelenmediği göz önüne bulundurularak, bu yeni problem ve uygulama alanı için, yeni metot üzerine çalışıldı. Mevcut tek kullanıcıli senaryo için geliştirilmiş gözü kapalı senkronizasyon metotlarının performansları bilgisayar simülasyonları ile karşılaştırıldı. Bu metotların performansları, kullanılan metriklerin birden fazla sembol üzerinden ortalaması alınarak iyileştirildi ve şekiller yardımıyla bu iyileştirilme gösterildi. Mevcut bu gözü kapalı metotlar iyileştirilmiş halleri ile, tezde ele alınan femto hücre sisteminin, makro hücre sisteminin UL'ine gözü kapalı olarak senkronize olma problemi için geliştirildi. Önerilen metot için yaklaşık ortalama karesel hatanın karakökü (RMSE) elde edildi ve simülasyonlarla karşılaştırıldı.

## 2. GENEL KISIMLAR

### 2.1. ÜSTÜN ÜÇÜNCÜ NESİL GEZGİN İLETİŞİM SİSTEMLERİ

Geniş bantlı kod bölmeli çoklu erişim (WCDMA) radyo-erişim teknolojisine dayalı üçüncü nesil (3G) uluslararası gezgin iletişim sistemleri (UMTS) , dünya hücresel bilgi servisi (WCIS) tarafından açıklanan verilere göre, 2005 yılı sonu itibariyle tüm dünyada 44 milyon kullanıcıya ulaşmıştır ve bu sayı artarak devam etmektedir. Bununla birlikte, kullanıcıların gezgin çoklu-ortam servislerinden faydalanma ve ağda aktif kalma süreleri de artmaktadır. Bu sebeple, IP üzerinden ses (VoIP), gezgin video ve paylaşımı gibi servislerden daha fazla yararlanabilmek için, daha yüksek veri hızlarına, daha hızlı tepki sürelerine ve daha uzun batarya ömürlü mobil cihazlara ihtiyaç duyulmaktadır. Bu gereksinimleri karşılayabilmek ve UMTS'in uzun vadede rekabetçiliğini devam ettirebilmek için var olan standartların geliştirilmesi gerekmiştir. Bu doğrultuda ilk adım, üçüncü nesil gezgin iletişim sistemlerinin mevcut GSM alt yapısı ile uyumlu olarak çalışması için teknik özellik ve standartları belirlemek amacıyla, dünyanın önde gelen standart enstitülerinin (ETSI, ARIB, TTC, CCSA TTA, ATIS) bir araya gelerek 1998 yılında oluşturduğu üçüncü nesil ortaklık projesi (3GPP) tarafından atılmıştır. Bu adım, UMTS'ye, yüksek hızlı paket erişimi (HSPA) adı verilen ve sırasıyla 2002 yılında yüksek hızlı aşağı link (downlink/DL) paket erişimi (HSDPA) ve 2004 yılında yüksek hızlı yukarı-link (uplink/UL) paket erişimi (HSUPA) teknolojilerinin eklenmesiyle atılmıştır [7]. Veri hızını DL'de 14.4 Mbps, UL'de ise 5.8Mbps'a kadar çıkaran, gecikmeyi azaltan bu sistemler, sistem kapasitesini de DL'de 5 kattan fazla, UL'de ise 2 kattan fazla arttırmaktadırlar. HSDPA ve HSUPA teknolojileri operatör ve kullanıcıların taleplerini kısa ve orta dönemde karşılayacak platformu oluşturmaktadır. Daha uzun bir dönemde operatör ve kullanıcıların artan taleplerini karşılayabilmek ve 3G teknolojisinin 10 yıl ve sonrasında da rekabetçi durumda olmasını garanti altına alabilmek amacıyla 3GPP var olan sistemlerin uzun-vadeli evrimi üzerinde çalışmalar başlatmıştır.

3GPP'nin üçüncü nesil gezgin iletişim sistemleri için oluşturduğu standartlar, farklı standartları birleştiren sürümler şeklinde düzenlenmektedir. Tablo 2.1'de bu sürümler verilmekte olup, bazı özelliklere vurgu yapılmıştır [8].

Günümüzde devam eden gelişmeler 3GPP (sürüm 7 ve üstü) tarafından yapılmaktadır ve UMTS Uzun Dönemli Evrim (Long Term Evaluation LTE) veya üstün üçüncü nesil sistemleri olarak adlandırılmaktadır.

Tablo 2.1: 3GPP Sürümleri

Sürüm	Tarih	Açıklama
Release 99	1999 sonu	Genişbantlı kod bölümlü çoklu erişim (WCDMA) arayüzüne sahip ilk UMTS 3G ağlarının, şartnamesi.
Release 5	2002	Yüksek hızlı aşağı bağ paket erişimi (HSDPA) şartnamesi.
Release 6	2004 sonu	Yüksek hızlı yukarı bağ paket erişimi (HSUPA) şartnamesi.
Release 7	2007 sonu	LTE'yi kapsar. Bekleme süresini azaltmaya ve VoIP gibi gerçek-zamanlı uygulamaların iyileştirilmesine yoğunlaşmıştır. Bu şartname aynı zamanda OFDM tekniğinin aşağı bağda kullanılmasına yoğunlaşmıştır.
Release 8	Devam etmekte	LTE

Üstün üçüncü nesil sistemler olarak da bilinen 3G-LTE sistemleri basitçe,

1. Kullanıcılara daha yüksek veri hızı ve IP tabanlı sistemlere dayalı yeni radyo erişim teknolojileriyle oluşturulmuş yeni servisler sağlayan,
2. Operatörlere ise 3G ağlarının basitçe yenilenmesine olanak sağlayan günümüz gezgin teknolojisinin evrimi olarak tanımlanabilir.

Üstün üçüncü nesil gezgin iletişim sistemlerinin temel özellikleri aşağıda sıralanmıştır [9]:

- DL kapasitesi: 20 Mhz'lik bantgenişliği ve 2x2 tek kullanıcı-MIMO (SU-MIMO) olduğunda 172.8Mbps'ye varan veri hızı
- UL kapasitesi: 20 Mhz'lik bantgenişliği ve 64QAM modülasyonda 86.4 Mbps'ye varan veri hızı
- İzge esnekliği: UL ve DL'te 1.4, 1.6, 3, 3.2, 5, 10, 15 ve 20 MHz bandgenişliklerini kapsayan 20Mhz'e kadar ölçeklendirilmiş bandgenişliği
- İzgesel Verimlilik: HSPA sistemlerine göre 2-4 kat fazla izgesel verimlilik.

- Gecikme süresi: Kullanıcı tarafında 5MHz ve daha üzeri izge tahsisi durumunda 5ms ve altında, daha dar izge tahsisi durumunda ise 10 ms altında gecikme süresi.
- Gezgincilik: 15 km/s'den daha az gezgin hızları için optimize edilmiş, 120 km/s kadar olan hızlarda yüksek performans sağlayan ve 350km/s' e kadar olan gezgin hızlarda bağlantının korunması
- Sadece paket anahtarlamalı alanı destekleyen yapı
- Daha önceki sürümlerle ve diğer sistemlerle (2G) birlikte çalışabilme.
- 5MHz ve altındaki spektrum tahsisi durumunda, bir hücre içinde en az 200 aktif kullanıcıyı destekleme
- Basitleştirilmiş sistem ve terminal karmaşıklığı

Üstün üçüncü nesil gezgin iletişim sistemlerinin, operatörlere çekici gelmesinin bir başka sebebi, temelden yeni bir sistemin yapılmasına gerek duymadan, var olan 3G iletişim ağlarını basitçe geliştirerek oluşturulabilmesidir.

Ancak bu hedeflere, mevcut 3G sistemlerinde kullanılan WCDMA hava arayüzü ile ulaşılmasının mümkün olmadığı anlaşılmıştır . Bunun sonucunda, alt kanallarda düşük sembol hızına ve çevrimsel ön ek (CP) kullanılmasıyla çok-yollu kanallarda ortaya çıkan semboller arası girişime (ISI) doğası gereği bağışık olan ve ayrıca dördüncü nesil (4G) sistemlerin hava ara-yüzüne aday olarak önerilen OFDM teknolojisinin, LTE olarak da bilinen Üstün Üçüncü Nesil (Süper 3G) gezgin iletişim sistemlerinin DL hava ara yüzünde kullanılmasına karar verilmiştir.

Hedeflenen amaçlar doğrultusunda, üstün üçüncü nesil gezgin iletişim sistemlerinde kullanılacak olan ileri teknolojiler (OFDM, MIMO, OFDMA, SC-FDMA) beraberinde çözülmesi gereken problemler getirmektedir. Bu tezde ele alınan problem, zamanlama senkronizasyonu problemidir.

## 2.2. OFDM'E GENEL BAKIŞ

Diksel Frekans Bölmeli Çoğullama'nın (OFDM) prensipleri, on yıllardır bilinmektedir. Buna karşın, ilk olarak 1966 yılında öne sürülen bu teknik, son zamanlarda hızlı bir şekilde kitaplardan, araştırma laboratuvarlarına sıçramış ve modern haberleşme sistemleri içinde kullanılır hale gelmiştir. Bu teknik, data iletim sistemleri, dijital radyo ve televizyon ve kablosuz haberleşme sistemlerinde kullanılmaktadır. European Dijital Ses ve Video Yayımı (DAB ve DVB), yüksek performanslı yerel alan sistemleri

(HIPERLAN) iletim tekniği olarak standartlaşan OFDM, IEEE 802.11 Telsiz yerel alan ağı (WLAN) standardı içinde de yerini almıştır. Ayrıca, dördüncü nesil gezgin iletişim sistemlerinin hava arayüzü olarak kullanılacağına da kesin gözüyle bakılmaktadır.

Tezin bu bölümünde, son zamanlarda bu kadar popüler hale gelen OFDM'i, ve çok-kullanıcılı OFDM olarak da bilinen OFDMA'i genel olarak incelenecek, avantajları ve deavantajları üzerinde durulacaktır.

### 2.2.1. Sistem Modeli

$N$  uzunluğundaki ayrık bir dizinin,  $f(n)$ , Ayrık Fourier Dönüşümü (DFT),  $F(k)$ ;

$$F(k) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} f(n) e^{-j \frac{2\pi kn}{N}} \quad (2.1)$$

ve Ters Ayrık Fourier Dönüşümü (IDFT),

$$f(n) = \sum_{k=0}^{N-1} F(k) e^{j \frac{2\pi kn}{N}} \quad (2.2)$$

şeklinde tanımlanır.

OFDM, seri olarak gelen bilgi bitlerini,  $N$  boyutluk paralel bloklara ayırır ve OFDM sinyalini elde etmek için IDFT kullanır. Zaman domenindeki sinyal, şu şekilde hesaplanır; [10]

$$\begin{aligned} x_m(n) &= IDFT \{ X_m(k) \} \\ &= \sum_{k=0}^{N-1} X_m(k) e^{j \frac{2\pi nk}{N}} \quad -N_{CP} \leq n \leq N-1 \end{aligned} \quad (2.3)$$

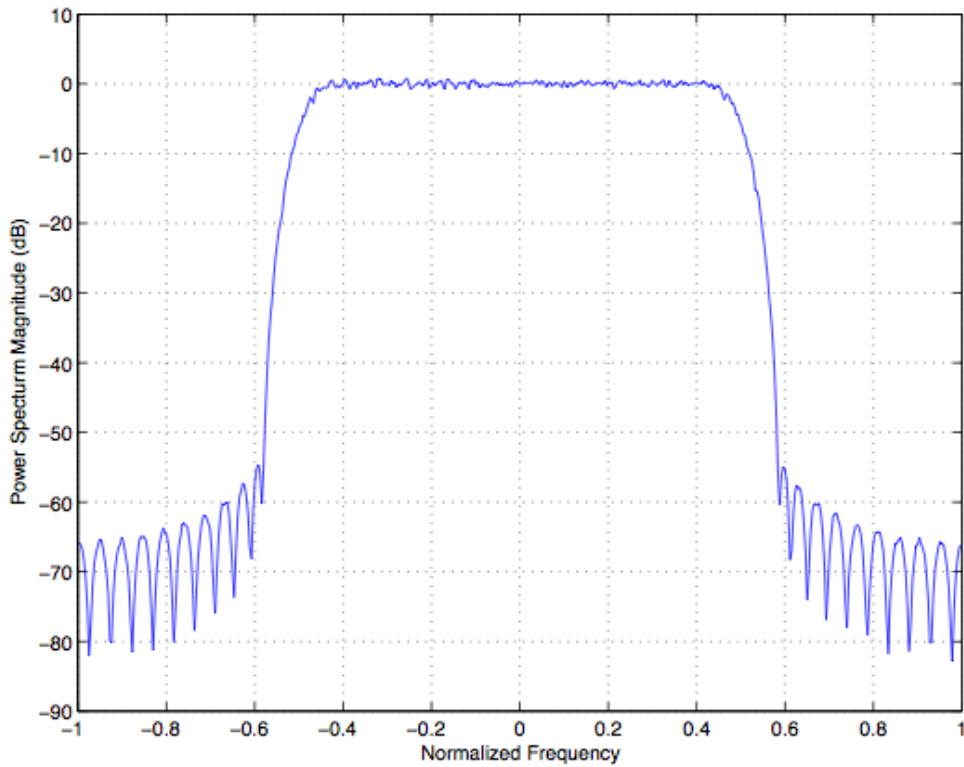
Burada  $X_m(k)$ ,  $m$ . OFDM sembolünün,  $k$ . alt-taşıyıcı üzerinde iletilen kısmı,  $N$  ise toplam alt-taşıyıcı sayısını ifade etmektedir. Semboller, veri bitlerinin, ikili faz kaydırmalı kipleme (BPSK), dördün genlik kiplenimi (QAM) vs. gibi  $M$ -li modülasyonu yapılarak elde edilir. Elde edilen zaman domenindeki sinyal, semboller arası girişimi (ISI) önlemek amacıyla, çevrimsel olarak  $N_{CP}$  örnek genişletilir.

İletilen OFDM sinyali, son olarak aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$x(n) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} x_m(n - m(N + N_{CP})) \quad (2.4)$$

$X_m(k)$  sembolleri, frekans domeni sinyali,  $x(n)$  ise zaman domeni sinyali olarak tanımlanır.  $N$ 'in çok büyük olduğu varsayıldığında, merkezi limit teoremini uyguladığımızda,  $x(n)$  sıfır-ortalımalı kompleks-değerli Gauss dağılımlı rastgele değişken olarak ele alınır.

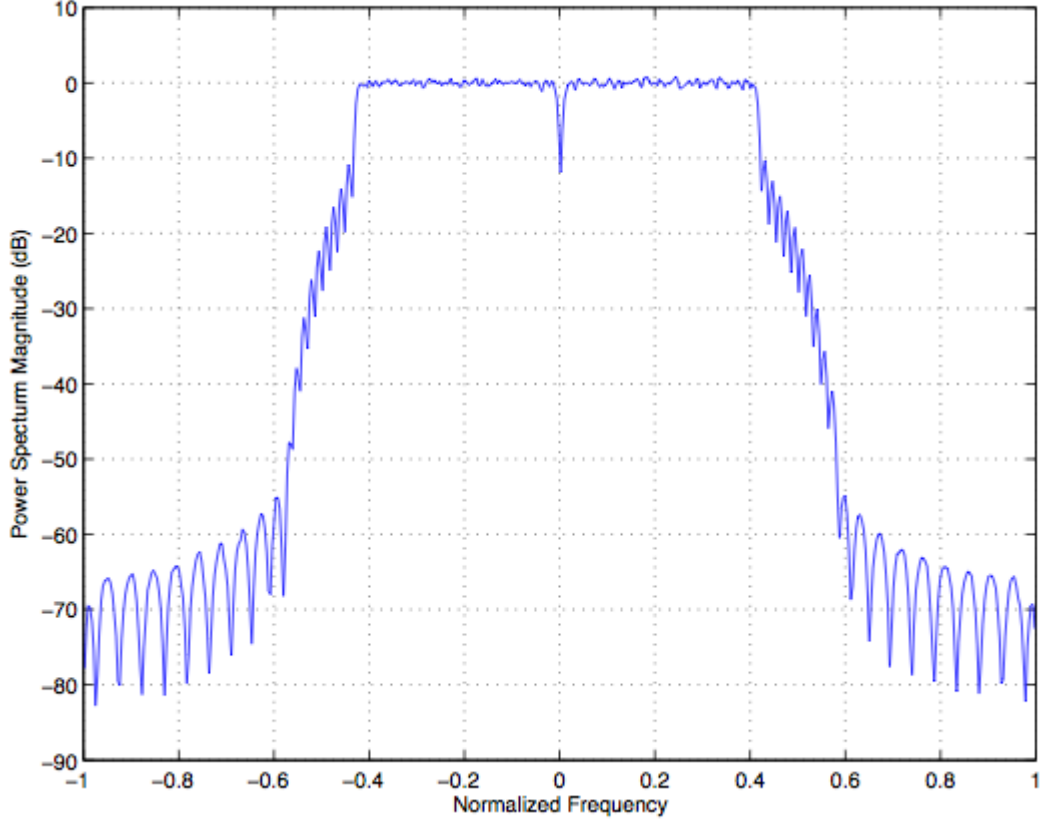
64 alt-taşıyıcıya sahip ve QPSK modülasyonu kullanılarak eşlenmiş bir OFDM sinyalinin güç spektrumu şekildeki gibidir [10];



Şekil 2.1: İletilen zaman domenindeki OFDM sembolünün güç spektral yoğunluğu

Alıcıdaki spektrum şekillendirme ihtiyacını basitleştirmek için, bazen spektrumun son kısımlarındaki alt-taşıyıcılar sıfırlanır. Bu alt-taşıyıcılar, literatürde frekans koruma

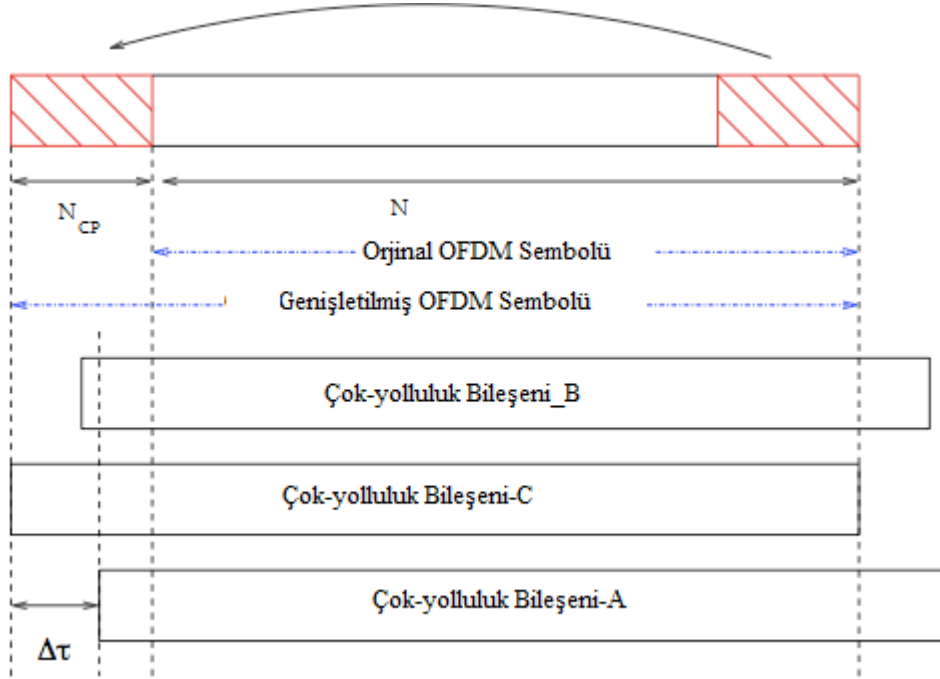
bandı olarak işlem görürler. Ayrıca D/A ve A/D dönüştürücülerdeki kaymalardan ve DC kaymadan kaçınmak için, DC'deki alt-taşıyıcı da sıfırlanır ve veri iletimi için kullanılmaz. Böyle bir sistem için, güç yoğunluk spektrumu aşağıdaki şekilde gösterilmiştir. Bu sistemde, spektrumun yan bölümlerinde sıfırlanan alt-taşıyıcı sayısı 11'dir [10].



Şekil 2.2: Yan kısımlardaki ve DC'deki alt-taşıyıcılar sıfırlandığında elde edilen OFDM sinyalinin güç spektral yoğunluğu

### 2.2.2. OFDM Sembolünün Önek ile Genişletilmesi

Zaman domenindeki OFDM sinyali, kanalın zaman yayılım etkisinden kurtulmak için, çevrimsel olarak genişletilir. Bu genişletme, basit olarak zaman-domenindeki bir OFDM sembolünün son kısmındaki bir parçanın, ön kısma eklenmesi ile elde edilir. ISI'dan korunmak için kullanılan bu önekin (CP) uzunluğu, en az kanalın maksimum gecikmesi kadar olmalıdır. Aşağıdaki şekilde, önekin oluşturulması ve oluşturulan önekin, ISI'ı nasıl önlediği gösterilmektedir [10].



Şekil 2.3: OFDM sembolünün önek ile genişletilmesi

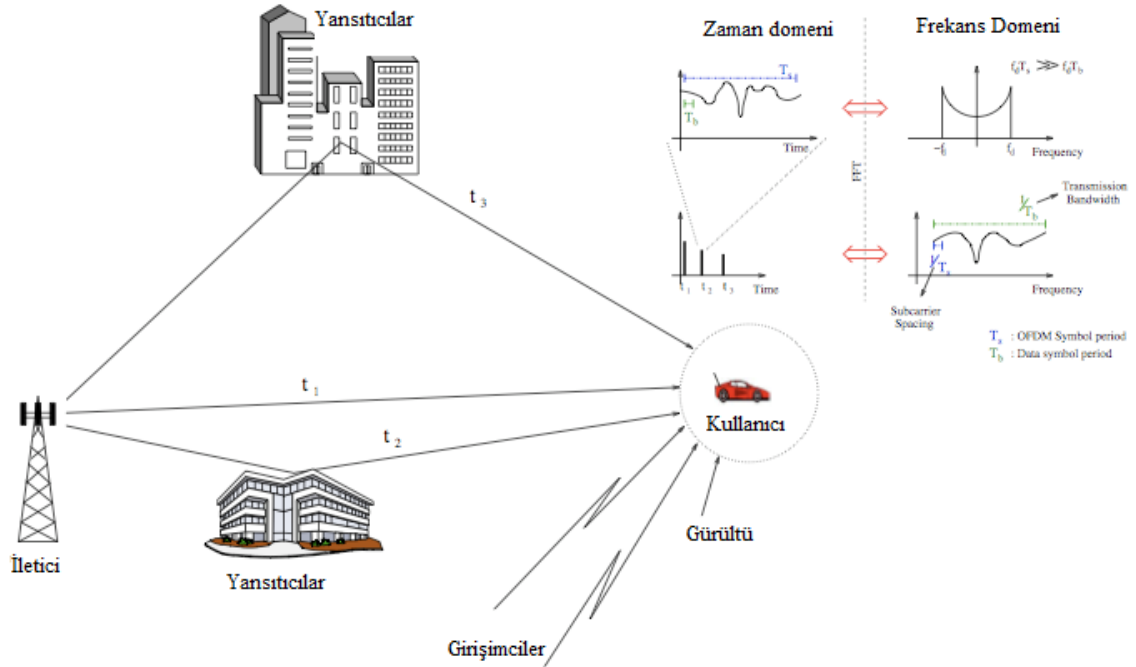
Şekilden görülebileceği gibi, CP uzunluğunun  $N_{CP}$ , kanalın maksimum gecikmesinden ( $\tau_{max}$ ) büyük olduğu durumda, sinyalin bozulan kısmı bu CP bölümü içinde kalmakta ve alıcı kısmında atılan bu parça ile, sinyalin ISI'den etkilenmesinde kaçınılmış olmaktadır. Fakat bunun karşılığında, sistemin spektral verimliliği düşmektedir [11]. Önek uzunluğunun, sembolün kullanışlı bölümünün uzunluğuna oranı, uygulanan probleme göre değişiklik göstermektedir. Önekin, koruma bandı olarak kullanılmasının başlıca sebepleri aşağıda özetlenmektedir;

1. Alıcıdaki zamanlama senkronizasyonunu sağlamak ; fakat uzun zamanlı bir gecikme, senkronizasyonun bozulmasına sebep olur.
2. Sinyal ile kanal arasındaki doğrusal konvolüsyonu, dairesel konvolüsyona çevirmek; Kanalın ve sinyalin dairesel konvolüsyonu sonucu oluşan sinyalin DFT'si, basitçe DFT'lerinin çarpımı şeklinde yazılabilir.
3. Dijital sinyal işleyiciler ile uygulanmasını kolaylaştırmak.

### 2.2.3. Kablosuz Kanal

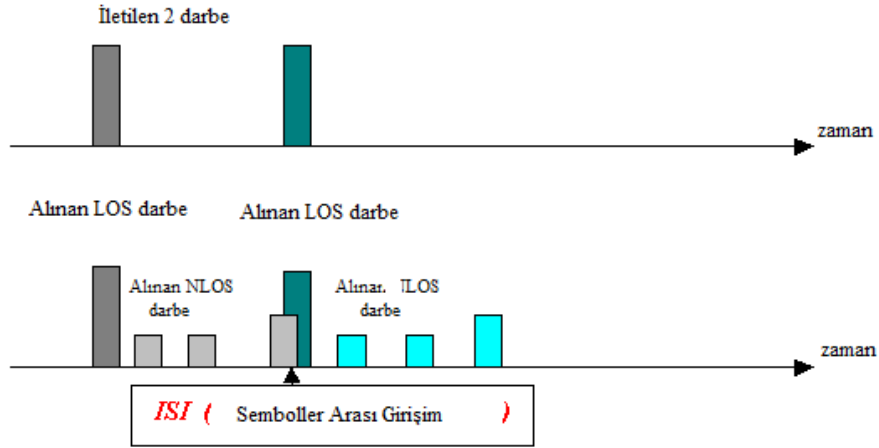
Kablosuz haberleşme sistemlerinde, veri alıcıya doğru kablosuz bir kanal aracılığıyla iletilir. İletilen bu sinyaller, şekil 2.4'de örnek olarak verilen, farklı gecikmelere,

genliklere ve fazlara sahip çok yollu kanaldan geçerken, saçılır, yansır ve kırılır. Çok-yollu iletim, sinyali belirgin ölçüde etkiler, sinyalin bozulmasına sebep olur ve bu da sistem performansını önemli ölçüde düşürür.



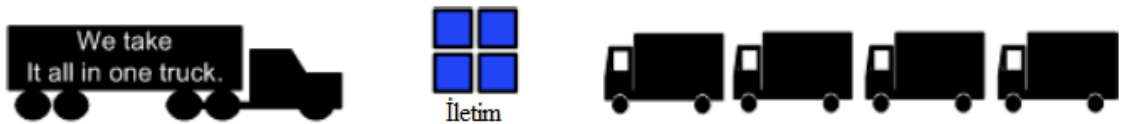
Şekil 2.4: Çok yollu kanalın oluşması, zaman ve frekans domeninde etkisinin gösterimi

İletim bandgenişliğine (ya da sembol süresi) ve haberleşmenin yapıldığı çevreye bağlı olarak, çok-yolluluk bir çok probleme sebep olur. Çok-yolluluktan kaynaklanan gecikmeler, sembol periyodundan küçükse, aynı sembole ait farklı yansımalar aynı zamanda elde edilir ve kanalın toplam etkisi, rastgele sönmüleme etkisidir. Buna karşılık, farklı yollara ait gecikmeler, sembol periyodundan büyükse, farklı sembolere ait yansımalar aynı anda elde edilir. Örneğin, bir sembol alıcıya bir yoldan ulaşırken, bir önceki sembol farklı bir gecikmeli yoldan aynı anda alıcıya ulaşır. Bu tip yansımaları kanalların, çok kompleks kanal cevapları vardır ve genel olarak zamanda yansıtımlı kanal (frekans seçici kanal) adını alırlar. Bu sebeple, eğer iletilen sembolün süresi, kanalın maksimum gecikmesinden küçükse, bu yayılma ISI'e neden olur. Şekilde ISI'in oluşumu açıkça gösterilmektedir.



Şekil 2.5: ISI oluşumu

Geleneksel olarak, tek taşıyıcılı sistemlerde, ISI alıcıdaki eşitleyiciler ile çözümlenir. Örneğin, mobil haberleşme için global sistemin (GSM)'de hücreli alıcılar, kanaldan ve filtre etkilerinden oluşan ISI'ı yoketmek için 3-5 dallı eşitleyicilere sahiptirler. Daha ve daha yüksek veri hızlarına olan talep arttıkça, doğal olarak ihtiyaç duyulan iletim bandgenişliği de bununla birlikte artmaktadır. Bu yüzden, iletilen sembol süresi (iletim bandgenişliğinin tersidir) azalmaktadır. Bunun sonucu olarak da, haberleşmenin yapıldığı bir çevrede ISI'in etkisi ve alıcıda gerekli olan denkleştirici karmaşıklığı çok büyük ölçüde artmaktadır. Çok-taşıyıcılı iletim ve OFDM, geniş frekans bandını, daha dar frekans bandlarına bölerek bu problemi çözmektedir. Şöyle ki, OFDM'de yüksek veri hızlı seri data,  $N$  toplam alt-taşıyıcı sayısı olmak üzere, herbirinin hızı  $N$ 'de 1 oranında düşerek, yani sembol süreleri  $N$  katına çıkararak, bu altkanallardan paralel olarak iletilirler. Bu sebeple de zamanda yansıtılmalı kanaldan daha az etkilenirler. Bu da OFDM'in, çok yüksek veri hızlarını hedefleyen yeni nesil haberleşme sistemleri tarafından tercih edilmesinin en büyük nedenidir.

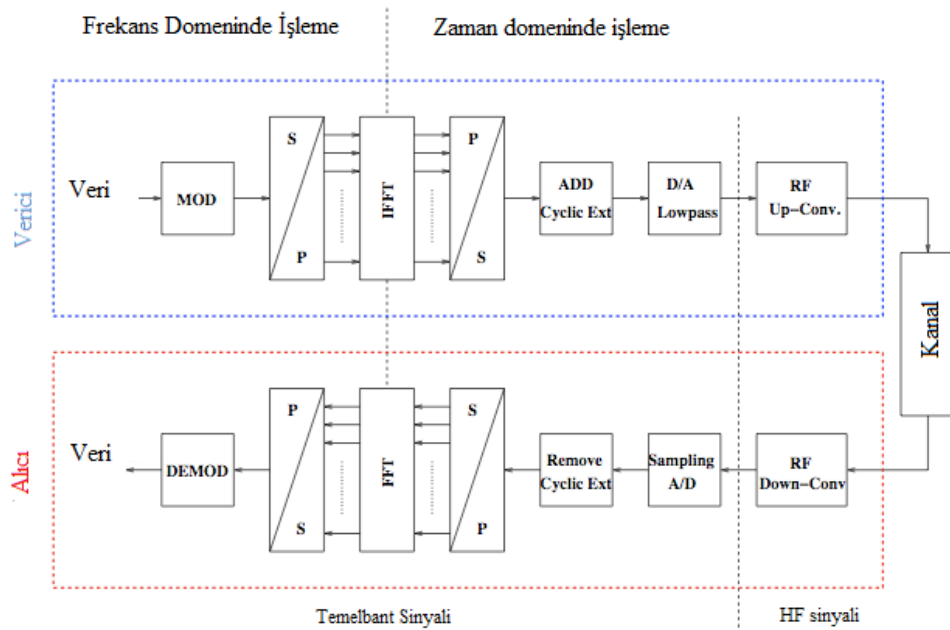


Şekil 2.6 : OFDM'de verilerin paralel iletimini ifade eden gösterim

Kanal eşitleyiciler, genel olarak kanalın çok-yolluluk etkisini kompanze etmek için kullanılmaktadır. Çok-yollu kanalın, yol sayısı arttıkça, sistem karmaşıklığı, denkleyiciler sebebiyle üssel olarak artmaktadır. OFDM sistemlerinin ISI'den korunmak için sahip olduğu bir diğer özellik, daha önce anlatıldığı her bir sembolün sonuna eklenen koruma bantları ile, sembol sürelerinin artmasıdır. Kanalın gecikme yayılmasını, kanalın farklı yollarında gelen ilk ve son sembol arasındaki süre farkı olarak tanımlarsak, ISI'den korunmamız için, CP süresinin bu süreden büyük olması gerekmektedir. Böylece OFDM sistemlerinden kanal eşitleyici karmaşıklığı, bu özelliklerinden dolayı, tek taşıyıcılı sistemlere göre son derece azdır.

#### 2.2.4. OFDM Sistemi

Basit bir OFDM sistemine ait blok diagram aşağıdaki şekilde gösterilmektedir. Genellikle işlenmemiş data, modüle edilmeden önce kodlanır ve ayrılır. Çok-yollu sönümlenmeli bir kanalda, her alt-taşıyıcı farklı bir sönümlenmeye sahiptir. Hatta bazı alt-taşıyıcılar kanaldaki çok büyük sönümlenmeler sonucunda tamamen kaybolabilirler. Bu sebeple, toplam Bit Hata Oranı (BER), en küçük genliğe sahip alt-taşıyıcının baskın olduğu bir durumda hesaplanabilir. Bu problemden kaçınmak için, kanal kodlama ve ayrılma işlemi yapılır. Kodlama işlemi ile, kodun oranına ve tipine göre hatalar belli bir seviyenin üstüne kadar düzeltilme yapılabilir. Kanal ayrılması ise, bitlerde meydana gelen hatanın rastgele oluşmasını sağlar.



Şekil 2.7: OFDM alıcı-verici blok diagramı

Kodlanmış ve ayrılmış data, data sembollerini oluşturmak için yıldız diagramındaki noktalara eşleştirilir. Bu seri dotalar, daha sonra zaman domenindeki OFDM sembollerini oluşturmak için, önce paralel bloklar haline getirilir daha sonra ise IFFT uygulanır. Elde edilen OFDM sembollerine CP eklendikten sonra analog sinyallere dönüştürülür ve mikserler kullanılarak radyo frekanslarına yükseltilir. Son olarak, kuvvetlendiriciler ile , gücü arttırılan sinyaller antenler yardımıyla iletilir.

Alıcı tarafında ise, alınan sinyal band-geçiren gürültü önleyici filtreden geçirilir ve ana bant frekansına indirilir. Zamanlama ve frekans eş-zamanlamasından sonra, CP kısmı atılır ve sinyal FFT'si alınarak frekans domenine geçirilir. Son olarak semboller demodüle edilir, ayrılma işleminin tersi yapılır, decode edilir ve iletilen bilgi bitleri elde edilir.

### 2.2.5. OFDM Dezavantajları

OFDM sistemlerinin yeni nesil haberleşme sistemlerinde tercih edilmesine yol açan avantajlarına rağmen, önemli dezavantajları da bulunmaktadır. Yüksek PAPR'e ( gücün uç değerinin, ortalama değerine olan oranı) sahip olmasının yanında, bu tezde de ele alınacak en büyük dezavantajı, OFDM sisteminin zaman ve frekans kaymasına tek taşıyıcılı sistemlere göre çok duyarlı olmasıdır.

#### 2.2.5.1. Frekans Kayması

Frekans kayması OFDM sistem tasarımında kritik bir faktördür. Şöyle ki, alt-taşıyıcılar arasındaki dikliği (ortogonalite) bozarak, taşıyıcılar arası girişim (ICI) oluşmasına neden olur. Frekans kaymaları, alıcı ve vericideki local osilatörlerin hatalarından ve hareketlilikten kaynaklanan Doppler kayması dolayısıyla oluşur. Genelde adaptif frekans düzelticiler ile kompanze edilen frekans kayması aksi halde OFDM sistemlerinin performansını önemli ölçüde etkiler.

Tezde zaman kayması problemi üzerine çalışmalar yapıldığı için, frekans kaymana ait matematiksel modellere ve çözümlerine girilmeyecektir. Problemimizde frekans kaymasının sistem tarafından çözümlendiğini varsayıyoruz.

#### 2.2.5.2. Zaman Kayması

OFDM sistemlerinden rastlanan diğer bir önemli problem ise, zaman kayması olarak adlandırdığımız, FFT penceresinin yer kaymasıdır. Şöyle ki, alıcıdaki  $N$  noktalı FFT, zamanda alınan  $N$  örneklilik blokları alarak, işler. İdeal olarak, FFT bloğunun aldığı bu

$N$  örneklilik bloğun, iletilen tek bir OFDM sembolüne ait örnekler olması gerekir. Pratikte ise alıcıda, gelen sembolün zamanda kayma süresi bilinmezse, FFT'si alınan  $N$  örneklilik blok, iletilen OFDM sembolüne ait olmayabilir. Eğer bu zaman kayması çok büyükse,  $N$  örneklilik bloğun bir kısmı, ilgili OFDM sembolüne aitken, diğer kaşan kısmı ise farklı bir OFDM sembolüne ait olacaktır. Böyle bir durum, alıcıdaki alt- taşıyıcıların yıldız diagramında çok ciddi bir bozulmaya sebep olacaktır. Bu durumun önlenmesi için, alıcıda çok iyi eş-zamanlama algoritmalarına ihtiyaç vardır. Böyle bir algoritmanın kullanıldığı durumda, bu kadar büyük zaman kaymaları meydana gelmeyecektir. Eş-zamanlama hatası ile birkaç örnek olacak olan zaman kayması veya FFT penceresinin yer kayması, OFDM sembolünün ISI'e karşı direçli olması için kullanılan CP sayesinde, sistem performansına zarar vermeyecektir.

Bahsi geçen zaman kaymasının veya FFT penceresinin yer kaymasının, iletilen OFDM sembolünün, kanaldan geçerken uğradığı gecikme olduğu anlaşılmalıdır. Adı geçen senkronizasyon algoritmaları ile, kestirilen bu kayma değerleri ile, alıcıdaki FFT penceresinin yeri ayarlanacak, ve FFT'si alınacak olan sembolün, tek bir OFDM sembolü olması sağlanacaktır. Böylece sistemdeki performans düşüşü engellenecektir.

Bahsi geçen zaman kaymasının, sisteme olan etkisini Fourier Dönüşünü teorisini hatırlayarak, daha iyi anlayabiliriz. Bilindiği gibi zamandaki kayma, frekanstaki faz farkına eşittir. Dolayısıyla, bilinmeyen zaman kaymalarına sahip OFDM sembolleri, FFT'si alınan alıcıda, elde edilen frekans domenindeki yıldız diagramlarında faz kaymasına neden olacaktır. Zamandaki kayma ne kadar büyük olursa, yıldız diagramındaki bozulma o kadar büyük olacak ve alıcının sembollerin decode edilirken yaptığı hata artacaktır. Bu da sistem performansında önemli bir düşüş demektir.

Zaman kaymasının oluşturacağı bu etki, matematiksel analizle şu şekilde gösterilebilir.  $X(k)$  iletilen OFDM sembollerini,  $x(n)$  iletilen zaman domenindeki OFDM sinyalini,  $y(n)$  alıcıda zaman kayması ile alınan OFDM sinyalini ve  $\tilde{X}(k)$  düzeltilmiş sembollerini gösterdiğini varsayalım.

$$X(k) \xrightarrow{IDFT} x(n) \xrightarrow{\text{timing error}} y(n) \xrightarrow{DFT} \tilde{X}(k)$$

$$\begin{aligned}
y(n) &= x(n \pm \theta) \\
&= \sum_{k=0}^{N-1} X(k) e^{j \frac{2\pi k}{N} (n \pm \theta)}
\end{aligned} \tag{2.5}$$

Zaman kayması, alınan sinyalin yanlış zamanda örnekleme dolayısıyla oluşur.  $\theta$ 'nın işareti, örnekleme zamanının, gerçek zamandan önce veya sonra yapılmasını gösterir. Bundan sonraki işlemlerde, işareti eksi olarak yapacağız. Buradan  $\tilde{X}(k)$ 'yi,  $y(n)$ 'den DFT olarak elde edebiliriz.

$$\tilde{X}(k) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} \left\{ \sum_{m=0}^{N-1} X(m) e^{j \frac{2\pi m}{N} (n-\theta)} \right\} e^{j \frac{2\pi kn}{N}} \tag{2.6}$$

$$= \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} \left\{ \sum_{m=0}^{N-1} X(m) e^{j \frac{2\pi(m-k)}{N} n} e^{-j \frac{2\pi m\theta}{N}} \right\} \tag{2.7}$$

$$= \frac{1}{N} \sum_{m=0}^{N-1} \left\{ \sum_{n=0}^{N-1} X(m) e^{j \frac{2\pi(m-k)}{N} n} \right\} e^{-j \frac{2\pi m\theta}{N}} \tag{2.8}$$

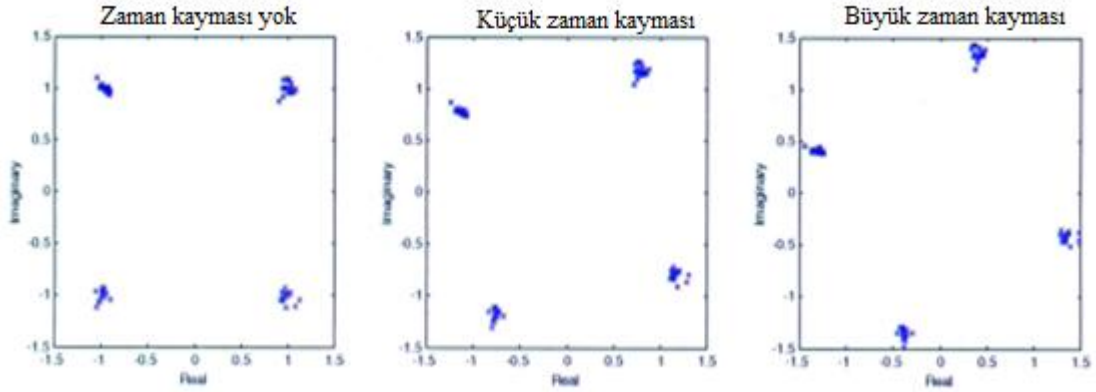
$$= \frac{1}{N} \sum_{m=0}^{N-1} X(m) \{N \Delta(m-k)\} e^{-j \frac{2\pi m\theta}{N}} \tag{2.9}$$

$$= \sum_{m=0}^{N-1} X(m) \Delta(m-k) e^{-j \frac{2\pi m\theta}{N}} \tag{2.10}$$

$$= X(k) e^{j \frac{2\pi k\theta}{N}} \tag{2.11}$$

Zaman kaymasının frekans domeninde yaratacağı faz kayması 2.11'de gösterilmektedir.

Farklı miktardaki zaman kaymalarının, yıldız diagramları üzerindeki etkisini ise Şekil 2.8 açıkça göstermektedir. Düşük frekanslara sahip alt-taşıyıcılar, zaman kaymasından daha az etkilenirken, bu etki yüksek frekanslara sahip alt-taşıyıcılarda daha yüksek olacak ve yıldız diagramlarında daha büyük bir etki görülecektir.



Şekil 2.8: Zaman kaymasının yıldız diagramı üzerindeki etkisi

### 2.3. OFDMA'E GENEL BAKIŞ

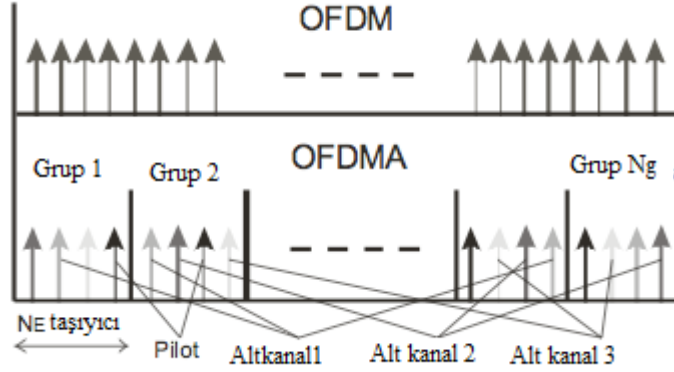
OFDMA, en genel hali ile OFDM'in çoklu-erişim şeklidir. Bu haliyle, WiMAX gibi yeni mobil kablosuz genişband sistemlerinde veya 4G sistemlerinde kullanılabilecek yeni özelliklere sahiptir. OFDM'e göre üstünlükleri diye yorumlayabileceğimiz bu özellikler şu şekilde sıralanabilir; [5]

- i. Aşağı ve yukarı-link iletiminde (DL ve UL), altkanallara bölme
- ii. Frekansların yeniden kullanılmasına daha çok olanak verme
- iii. FFT'nin ölçeklendirilebilmesi

OFDMA'in en büyük avantajı, mevcut alt-taşıyıcıların gruplandırılarak, farklı kullanıcılara atanabilmesidir. Bunun yapılabilmesi için, sistemin sahip olduğu alt-taşıyıcılar, her birine alt-kanal adı verilen alt gruplara ayrılıyor ve ihtiyaç duyan sistemdeki kullanıcılara, bu gruplar atanıyor. Bunun yapılmasındaki ana amaç, ölçeklendirilebilirlik, çoklu iletişim ve ileri anten dizilim işleme algoritmaları kabiliyetlerine olanak vermesidir. OFDMA ayrıca, kullanıcıları etkileyen girişimleri azaltır ve hareketli bir çevrede kaçınılmaz olan direk olmayan görüş hattı (*NLOS*) durumunda geliştirilmiş yeteneklere sahiptir.

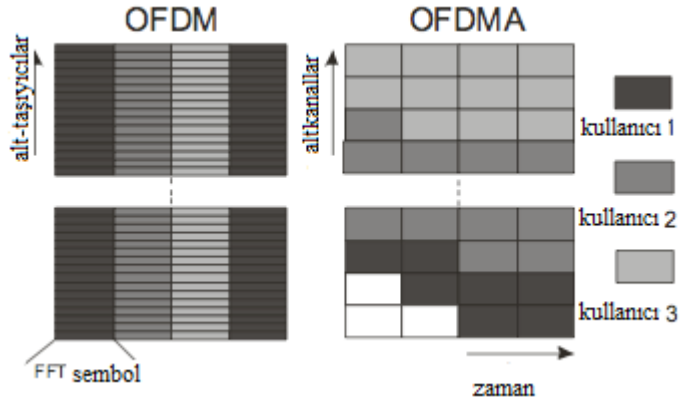
Alt kanallara bölme işleminin prensipleri aşağıdaki şekilde görülmektedir. Taşıyıcı aralığı (band genişliği gibi de düşünülebilir)  $N_U$  gruba ayrılır. Her grup  $N_E$  tane taşıyıcı içerir, bu sebeple toplamda  $N_U$  tane alt kanal oluşmuş olur. Her bir alt kanal için kodlama ve modülasyon şekli birbirinden bağımsız olarak belirlenir. Böylece alt-

taşıyıcılar farklı kullanıcılara atanabilir. Her bir kullanıcıya, bir alt-kanal atanabileceği gibi, kanal durumlarına ve sistemdeki toplam kullanıcı sayısına göre, birden fazla alt-kanal da atanabilir. Bu durum, kullanıcılara en uygun alt-kanalı atayarak, elindeki kaynakları en iyi şekilde değerlendirme olanağı sağlanan operatörler için, çok avantajlı bir durumdur.



Şekil 2.9: OFDM ve OFDMA’de alt-taşıyıcıların tahsis edililişinin karşılaştırılması

Alt kanallara bölme işlemi, UL için başka bir avantaj daha getirir. Şekilde görüleceği gibi, OFDM sistemlerinde, kullanıcıyı veriyi tüm frekans bandını kullanarak gönderir. OFDMA’de ise kullanıcılar ancak kendilerine atanan alt-kanalları kullanarak verilerini gönderebilirler. Bu da UL’de OFDMA’in, OFDM sistemlerine göre güç kazancı sağlamasına neden olur ve UL’de baz istasyonuna bilgi gönderen mobil kullanıcılar için bu durum son derece önemlidir. Alt-kanallara ayrılma işlemi sırasında, her bir alt-kanala ait olan alt-taşıyıcılar iki farklı yolla belirlenirler: sürekli veya ayrık. Sürekli alt-taşıyıcıların gruplandırılması ile oluşturulan alt-kanallarda iletimin yapıldığı durumda frekans çeşitliliği sağlanmaz [11]. Ayrık alt-taşıyıcıların rastgele seçilmesi ile oluşturulan alt-kanallar ile sistemde frekans çeşitliliği sağlanır fakat bu durumda, kullanıcı sinyallerinin birbirinden ayrılması ve eş-zamanlama problemi daha karmaşık hale gelmektedir.



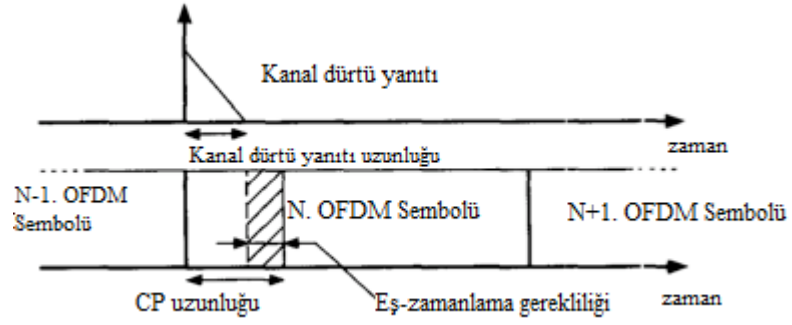
Şekil 2.10: OFDM ve OFDMA'de UL yapısı

Bu avantajlarına karşın, OFDMA sistemleri de OFDM gibi zaman ve frekans kaymalarına karşı çok duyarlıdır. Özellikle UL'de daha ciddi problem oluşturan bu problem, ISI (semboller arası girişim) oluşturacağı gibi, alt-taşıyıcılar arasındaki dikliğin bozulmasıyla, ICI (taşıyıcılar arası girişim) oluşmasına da neden olur.

Tek kullanıcı OFDM ve çok kullanıcı OFDMA tabanlı sistemlerde, bu derece önemli olan zamanlama senkronizasyonu, diğer bölümlerde matematiksel analizleri yapılarak incelenecek ve bu konuda yapılan çalışmalara yer verilecektir.

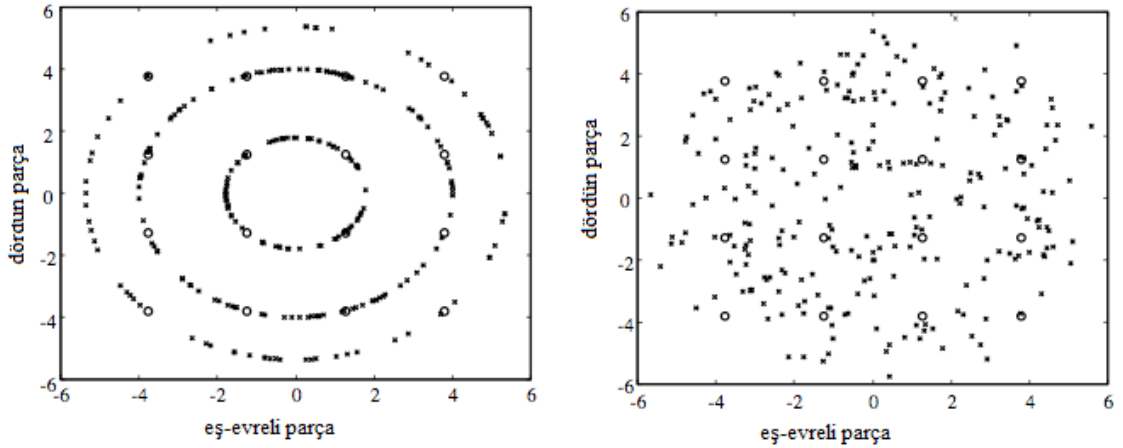
#### 2.4. OFDM TABANLI SİSTEMLERDE ZAMAN SENKRONİZASYON PROBLEMİ

OFDM sistemleri için senkronizasyon kritik bir problemdir. OFDM sistemlerinde zaman kayması kestirimcisi ihtiyacı, sistemin ön ek (CP) uzunluğu ile kanalın impuls cevabı arasındaki fark ile belirlenir. Eğer zaman kayması bu farkı geçmezse yani, sembolün CP aralığı içinde kalırsa, alt-taşıyıcıların dikliği bozulmaz ve zaman kayması sadece sembollerin yıldız diagramında faz kaymasına neden olur. Ve zaman kaymasının etkisi, alıcıda frekans domeni kanal eşitleyiciler tarafından kolaylıkla kompanse edilir. Zaman kaymasının, sistemin performansını etkilemeye başladığı an ise, zaman kaymasının bu farkın dışına çıktığı zaman oluşmaktadır. Alt-taşıyıcıların dikliği bozulur, ISI ve ICI oluşur [12].



Şekil 2.11: ISI ve ICI'dan kaçınmak için zaman kayması gereksinimi

Zaman kayması belirtilen bölge içinde olduğu sürece, sistemde ISI ve ICI oluşmaz. Aksi halde oluşan ISI ve ICI ile alıcıdaki alt-taşıyıcıların yıldız diagramının nasıl etkilendiği ve bu problemin üstesinden gelinmediği durumda, sembollerin demodüle edilmesi sırasında oluşabilecek hatanın büyüklüğü aşağıdaki şekilde görünmektedir [13].



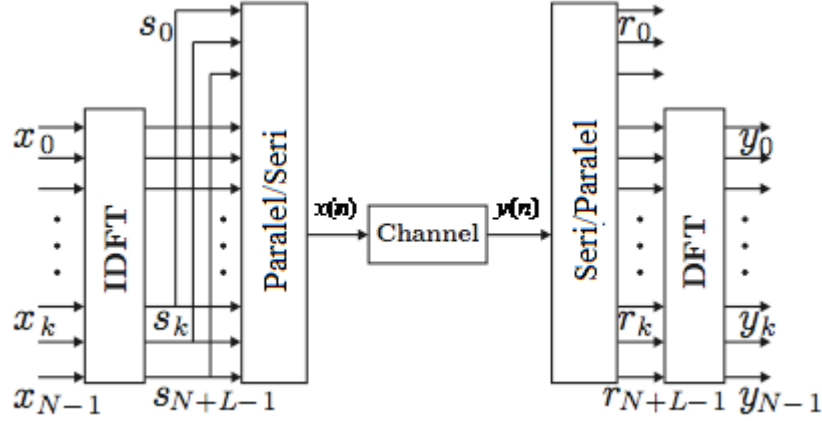
Şekil 2.12 : CP uzunluğu 10 olan bir OFDM sisteminde, zaman kayması 1(solda) ve 25(sağda) olduğu durumda 16-QAM yıldız diagramındaki değişim

Bu nedenle, bu problem çok dikkat çekmiş ve bir çok çalışma yapılmıştır.

#### 2.4.1. Sinyal Modeli

Bazı sinyal yıldız diagramlarından (BPSK, QAM) elde edilen kompleks veri bitlerinin, basit bir OFDM sisteminden geçişi şekil 2.13'de gösterilmiştir. Bu veri bitleri daha

sonra IDFT bloğu kullanılarak N tane alt-taşıyıcı üzerine modüle edilir ve son kısmı, ön kısmına CP olarak eklenir ve  $x(n)$  OFDM sinyali elde edilir [4].



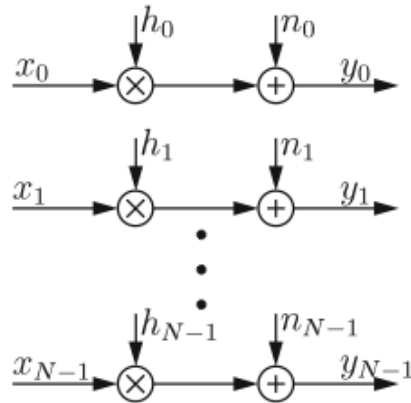
Şekil 2.13: Bir OFDM Sistemi

Bu sinyal kanaldan seri olarak iletilir, alıcıda elde edilen  $y(n)$  sinyalinden CP kısmı atıldıktan sonra DFT kullanılarak demodüle edilir.

Giriş ve çıkış arasındaki ilişki, basitçe aşağıdaki gibi yazılır.

$$y_k = h_k x_k + n_k \quad k = 0, \dots, N-1 \quad (2.12)$$

Bu eşitlikte,  $h_k$ ,  $k$  alt-taşıyıcısındaki zayıflamayı gösterirken  $n_k$  ise Toplamsal Beyaz Gauss Gürültüsü (AWGN)'nü gösterir. Bu OFDM sisteminin eşdeğer modeli şekil 2.14'de görülmektedir [13].



Şekil 2.14: OFDM sisteminin eşdeğer modeli

Bu durumda,  $L$  kademeli (CP uzunluğundan küçük olmak üzere), çok yollu kanaldan geçerek alıcıya ulaşan  $y(n)$  sinyali şu şekilde yazılabilir;

$$y(n) = \sum_{l=0}^{L-1} h(l)x(n-\theta-l) \quad (2.13)$$

Kanalın çok yolluluğu, sistem modelini karmaşık hale getirmektedir.

Bundan sonra ele alınacak analizlerde, kanalın dağıtıcı özelliğinin olmadığı ve iletilen  $x(n)$  sinyalinin sadece  $n(n)$ 'den etkilendiği varsayılacaktır. ( $h_k = 1, \forall k \in \{0, \dots, N-1\}$ ).

Bu durumda alıcıya ulaşan sinyali, frekans kaymasını göz ardı ederek şu şekilde yazabiliriz.

$$y(n) = x(n-\theta) + n(n) \quad (2.14)$$

OFDM tabanlı sistemlerde, zamanlama senkronizasyonu problemi, alıcıya ulaşan  $y(n)$  sinyalinden, sinyalin gecikmesinin,  $\theta$ , en doğru bir şekilde kestirilmesi problemidir.

Bu eşitlikte  $x(n)$  iletilen sinyali,  $x_k$  veri bitlerinin IDFT'sidir. Yani  $x(n)$ , birbirinden bağımsız, eş dağılımlı rastgele değişkenlerin lineer kombinasyonu şeklindedir. Merkezi limit teoreminden bilindiği gibi, sistemin alt-taşıyıcı sayısının büyük olduğu durumda,  $x(n)$  rastgele sürecinin dağılımı, reel ve imajinel kısımları birbirinden bağımsız olan kompleks Gauss dağılımına yaklaşır. Fakat, sembollerin başına eklenen CP sayesinde,  $x(n)$  sürecinin bazı parçaları birbiri ile korele olduğundan dolayı, süreç beyaz bir süreç değildir. Dolayısıyla  $y(n)$  süreci de beyaz bir süreç değildir fakat, senkronizasyon parametresi olan zaman kaymasına ait bilgiyi içerir.

Amaç, elimizde bulunan bu bilgiler ile, zaman kaymasının en doğru bir şekilde kestirilmesidir. Daha önce de bahsedildiği gibi, zamanlama senkronizasyonu için kullanılan yöntemleri genel olarak iki ana başlık altında incelenir; Pilot sembollere ihtiyaç duyan, veri destekli yöntemler ve herhangi ek bir sembole ihtiyaç duymayan, gözü kapalı yöntemler. Veri destekli senkronizasyon yöntemlerinde kullanılan pilot

sembolleri, sistemin veri hızını düşürmektedir, bu yüzden gözü kapalı yöntemlerin kullanılması arzu edilmektedir.

#### 2.4.2. OFDM Sistemleri için Gözü Kapalı Zamanlama Senkronizasyonu Teknikleri

Tek kullanıcı OFDM sistemleri için gözü kapalı senkronizasyon teknikleri, literatürde araştırılmış bir konudur. Gözü kapalı senkronizasyon için kullanılan yöntemlerden en popülerleri, CP'ye dayalı yöntemlerdir. [4,14,15]. Bu yöntemler genel olarak, OFDM sembollerinde bulunan CP sayesinde, senkronizasyon problemi için yeterli bilgiye sahip olma özelliğini kullanır. Bu sayede pilot semboller kullanılarak, sistem performansının düşüşü de engellenmektedir. Bu bölümde, bu konuda yapılmış olan çalışmalardan kısaca bahsedilecek ve performans karşılaştırmaları yapılacaktır.

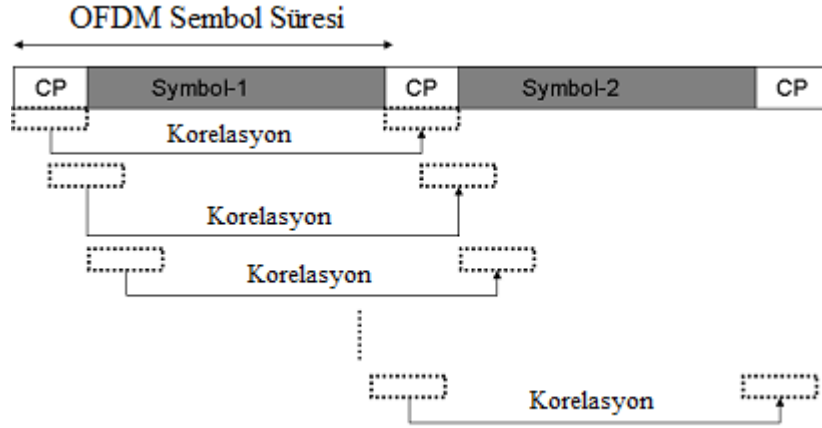
Senkronizasyon amacı için kullanılan fonksiyonları aşağıdaki gibi tanımlanmaktadır.

$$\gamma(\theta) = \sum_{n=\theta}^{\theta+N_{CP}-1} y(n)y^*(n+N) \quad (2.15)$$

$$\phi(\theta) = \sum_{n=\theta}^{\theta+N_{CP}-1} y(n)y^*(n) \quad (2.16)$$

Bu eşitliklerde,  $y(n)$  OFDM sinyalinden alınan örnekleri,  $N_{CP}$  ve  $N$  sırasıyla sembolün CP ve yararlı sembol uzunluğunu, örnek cinsinden ifade etmektedir. Bir sonraki bölümde anlatılan, tüm metriklerin hesaplanması için gereken  $\gamma(\theta)$ 'nin hesaplanması şekil 2.15'de resmedilmiştir. Burada OFDM sembolü içindeki tüm olası zaman kaymaları için, kaydırma metodu ile korelasyon fonksiyonu hesaplanmaktadır.

Tek kullanıcı senaryosunda, tek yönlü AWGN kanal için, hesaplanan bu korelasyon fonksiyonu, OFDM sembolünün gerçek varış zamanında,  $\theta$ , tek bir uç noktası vermektedir Dolayısıyla elde edilen  $\gamma(\theta)$  fonksiyonu ile, zaman kaymasını kolayca kestirilir. Daha sonra anlatılacak diğer tüm gözü kapalı metrikler, temelde bu korelasyon özelliğini kullanır ki, bu da OFDM sembollerinde bulunan CP sayesinde elde edilir.



Şekil 2.15: Korelasyon fonksiyonunun elde edişi

Şekilden de görüleceği gibi, alıcıya ulaşan OFDM sembollerinden CP uzunluğunda bir parça alarak, OFDM sembolünün yararlı kısım uzunluğu olan  $N$  kadar ötedeki,  $N_{CP}$  parçalık diğer bir kısmıyla çarpılıyor. Bu işlem kaydırılarak devam ediyor. Sembolün son kısmındaki parça, kopyalanarak CP oluşturulduğu için, birbiri ile aynı olan bu iki parça üst üste geldiği yerde, elde edilen  $\gamma(\theta)$ , uç noktasını veriyor, bu nokta ile sembolün başlangıç noktası olan  $\theta'$  elde ediliyor. Böylece sadece alıcıya ulaşan  $y(n)$  sinyali kullanılarak, başka bir bilgiye ihtiyaç duymadan, zaman kayması gözü kapalı bir şekilde kestiriliyor.

CP tabanlı gözü kapalı sekronizasyon yöntemleri ve kullandıkları metrikler aşağıdaki gibidir. Bu metotlardan bazıları sadece korelasyon fonksiyonuna bakarken, bazıları ise örneklerin güçlerini de işin içine katmaktadırlar.

Bu metotlardan karmaşıklığı en yüksek olmasına rağmen, en iyi performansa sahip olanı, bu konudaki ilk çalışmaları yapmış olan Beek tarafından elde edilmiştir. ML metot olarak da bilinen bu metotta, senkronizasyon parametrelerini içeren bir olabilirlik fonksiyonunun logaritması alınarak elde edilen amaç fonksiyonu elde edilmekte, daha sonra bu fonksiyonun maksimum değerini veren noktalar olarak parametreler kestirilmektedir. 2.15 ve 2.16 eşitliklerinde, senkronizasyon amacı ile verilen fonksiyonlar, Beek'in 1999 yılında yazdığı bu çalışma [4] sonucu elde edilen fonksiyonlardır ve bir çok farklı metot tarafından kullanılmaktadır.

Bu sebeple, öncelikle ML metodu ayrıntıları ile incelenecek ve bu fonksiyonların elde edilmesi gösterilecektir. Daha sonra ise, bu fonksiyonları kullanan diğer gözü kapalı metotlar anlatılacaktır.

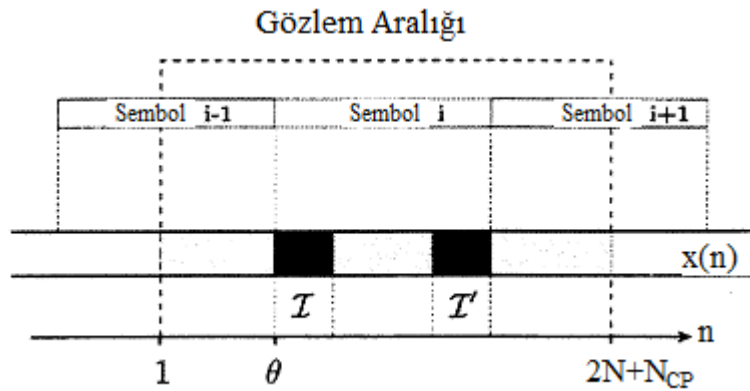
Genel olarak CP'ye dayalı olan tüm gözü kapalı senkronizasyon metotları, Beek'e ait olan bu metotun iyileştirilmesi, karmaşıklığının azaltılması gibi amaçlardan doğmuştur.

#### 2.4.2.1. ML (En Büyük Olabilirlik) Metot

(2.14)'deki temel matematiksel modelimizde, daha önce ifade edildiği gibi  $x(n)$  iletilen OFDM sembolünü,  $w(n)$  ise toplamsal beyaz gauss gürültüsünü ifade etmektedir. Ayrıca  $x(n)$  ve  $y(n)$ 'nin beyaz olmayan, kompleks gauss süreci olduğu ifade edilmişti. Bundan sonraki çıkarımlarda, AWGN gürültüsü  $n(n)$  yerine  $w(n)$  ile gösterilecektir.

$$y(n) = x(n - \theta) + w(n) \quad (2.17)$$

Bu durum göz önüne alınarak, sadece alınan  $y(n)$  sinyali kullanılarak, zamanlama senkronizasyon parametresi, gözü kapalı bir şekilde kestirilecektir. Bu amaçla  $y(n)$  sinyalinden  $2N + N_{CP}$  tane ardışık örnekler alınmaktadır. Şekil 2.16'dan görüldüğü gibi, bu örnekler  $N + N_{CP}$  örnekten oluşan tam bir OFDM sembolünü içermektedir. Fakat bu sembolün başlangıç noktası,  $\theta$ , kanaldan kaynaklanan kayma dolayısıyla, alıcı tarafından bilinmemektedir [4].



Şekil 2.16: OFDM sinyalinin yapısı

Alınan bu örnekler içerisinde,  $I$  ve  $I'$  setleri oluşturulmaktadır.  $I'$  seti, OFDM sembolünün CP olarak kopyalanan kısmının indexlerini, gösterirken,  $I$  ise CP örneklerinin indekslerini göstermektedir.

$$I \cong \{\theta, \dots, \theta + N - 1\} \text{ ve}$$

$$I' \cong \{\theta + N, \dots, \theta + N + L - 1\}$$

Bu durumda alıcıya gelen  $y(n)$  sinyallerinden alınan  $2N + N_{CP}$  tane örnekten oluşan vektör, şu şekilde yazılır:  $y \cong [y(1) \dots y(2N + N_{CP})]^T$

$y(n)$  sinyali içindeki, datanın kopyalanan kısmı ile CP'nin,  $y(n)$ ,  $n \in I \cup I'$ , karşılıklı korele olduğu akılda bulundurulmalıdır.  $\sigma_x^2 = E\{|x(n)|^2\}$  ve  $\sigma_w^2 = E\{|w(n)|^2\}$  olmak üzere,

$$E\{y(n)y^*(n+m)\} = \begin{cases} \sigma_x^2 + \sigma_w^2 & m = 0 \\ \sigma_x^2 & m = N \\ 0 & \text{dışında} \end{cases} \quad (2.18)$$

Matematiksel olarak bu eşitliği göstermek gerekirse,

1)  $m = 0$  için,

$$\begin{aligned} E\{y(n)y^*(n+m)\} &= E\{y(n)y^*(n)\} = E\{(x(n-\theta) + w(n)).(x^*(n-\theta) + w^*(n))\} \\ &= E\{x(n-\theta)x^*(n-\theta)\} + \\ &\quad E\{x(n-\theta)w^*(n)\} + \\ &\quad E\{x^*(n-\theta)w(n)\} + \\ &\quad E\{w(n)w^*(n)\}. \end{aligned} \quad (2.19)$$

Bu eşitlikte,  $x(n)$  OFDM sinyali ile  $w(n)$  gürültüsü istatistiksel bağımsız olduğu için, 2. ve 3. terim 0' a eşittir. 1. ve 4. eşitlikler ise sırasıyla iletilen sinyalin ve gürültünün gücünü vermektedir.

$m=0$  için,

$$\begin{aligned}
E\{y(n)y^*(n+m)\} &= E\{y(n)y^*(n)\} = E\{(x(n-\theta)+w(n)).(x^*(n-\theta)+w^*(n))\} \\
&= E\{x(n-\theta)x^*(n-\theta)\} + && \rightarrow \sigma_x^2 \\
&E\{x(n-\theta)w^*(n)\} + && \rightarrow 0 \\
&E\{x^*(n-\theta)w(n)\} + && \rightarrow 0 \\
&E\{w(n)w^*(n)\}. && \rightarrow \sigma_w^2 \\
&= \sigma_x^2 + \sigma_w^2
\end{aligned} \tag{2.20}$$

2)  $m=N$  için,

$$\begin{aligned}
E\{y(n)y^*(n+m)\} &= E\{y(n)y^*(n+N)\} = E\{(x(n-\theta)+w(n)).(x^*(n+N-\theta)+w^*(n+N))\} \\
&= E\{x(n-\theta)x^*(n+N-\theta)\} + \\
&E\{x(n-\theta)w^*(n+N)\} + \\
&E\{x^*(n+N-\theta)w(n)\} + \\
&E\{w(n)w^*(n+N)\}.
\end{aligned} \tag{2.21}$$

Burada diğer durumda olduğu gibi,  $x(n)$  OFDM sinyali ile  $w(n)$  gürültüsü istatistiksel bağımsız olduğu için, 2. ve 3. terim 0' a eşittir. Toplamsal beyaz gauss gürültüsünün, aralarında  $N$  örnek fark bulunan iki noktası arasındaki ilişkiyi gösteren son terim ise, sürecin beyaz olmasından dolayı, 0'a eşittir. İlk terim ise, iletilen OFDM sinyalinin gücünü göstermektedir. Bu durumda eşitlik;

$m=N$  için,

$$\begin{aligned}
E\{y(n)y^*(n+m)\} &= E\{y(n)y^*(n+N)\} = E\{(x(n-\theta)+w(n)).(x^*(n+N-\theta)+w^*(n+N))\} \\
&= E\{x(n-\theta)x^*(n+N-\theta)\} + && \rightarrow \sigma_x^2 \\
&E\{x(n-\theta)w^*(n+N)\} + && \rightarrow 0 \\
&E\{x^*(n+N-\theta)w(n)\} + && \rightarrow 0 \\
&E\{w(n)w^*(n+N)\}. && \rightarrow 0 \\
&= \sigma_x^2
\end{aligned} \tag{2.22}$$

3) otherwise

$$\begin{aligned}
E\{y(n)y^*(n+m)\} &= E\{(x(n-\theta) + w(n)).(x^*(n+m-\theta) + w^*(n+m))\} \\
&= E\{x(n-\theta)x^*(n+m-\theta)\} + && \rightarrow 0 \\
&E\{x(n-\theta)w^*(n+m)\} + && \rightarrow 0 \\
&E\{x^*(n+m-\theta)w(n)\} + && \rightarrow 0 \\
&E\{w(n)w^*(n+m)\}. && \rightarrow 0 \\
&= 0
\end{aligned} \tag{2.23}$$

Birinci terim, sadece  $m = N$  olduğu durumda, sinyalin gücünü vermektedir aksi halde, CP dışında kalan noktalarda,  $y(n)$  ve  $y(n+m)$  ilintisizdir.

Sonuç olarak  $y(n)$  alınan sinyalinde  $n \in I \cup I'$  iken, yukarıdaki eşitliklerde açıkça gösterildiği gibi, parçalı ilişkili, iken ise tüm noktalar ilişkisizdir.

$\theta$  bilinmeyen için, olabilirliğin logaritması fonksiyonu,  $\Lambda(\theta)$ ,  $\theta$  verildiği durumda  $2N + N_{CP}$  uzunluklu  $y$  gözlem vektörünün olasılık yoğunluk fonksiyonunun logaritmasıdır,  $\hat{f}(y|\theta)$ .

$$\begin{aligned}
\Lambda(\theta) &= \log f(y|\theta) \\
&= \log \left( \prod_{n \in I} f(y(n)y(n+N)) \prod_{n \notin I \cup I'} f(y(n)) \right) \\
&= \log \left( \prod_{n \in I} \frac{f(y(n)y(n+N))}{f(y(n)).f(y(n+N))} \prod_{n \notin I \cup I'} f(y(n)) \right)
\end{aligned} \tag{2.24}$$

Bu eşitlikteki tüm toplamsal ve çarpımsal sabit terimler, logaritma fonksiyonunun maksimizasyonunu etkilemediği için atılır.

$y$ 'nin birleşik Gauss vektörü olduğu varsayımı durumda ve ara işlemler yapılarak olabilirliğin logaritma fonksiyonu veya ML metriği [4],

$$\Lambda(\theta) = |\gamma(\theta)| - \rho\phi(\theta) \tag{2.25}$$

şekilde yazılır. Burada,

$$\gamma(\theta) = \sum_{n=\theta}^{\theta+N_{CP}-1} y(n)y^*(n+N) \quad (2.26)$$

$$\phi(\theta) = \sum_{n=\theta}^{\theta+N_{CP}-1} y(n)y^*(n) \quad (2.27)$$

$$\begin{aligned} \rho &= \left| \frac{E\{y(n)y^*(n+N)\}}{\sqrt{E\{|y(n)|^2\}E\{|y(n+N)|^2\}}} \right| \\ &= \frac{\sigma_x^2}{\sigma_x^2 + \sigma_w^2} \\ &= \frac{SNR}{SNR + 1} \end{aligned} \quad (2.28)$$

Korelasyon metriği olarak adlandırılan ve Şekil 2.15’de hesaplanışı resmedilen fonksiyonun genliği,  $\Lambda(\theta)$  fonksiyonun ilk terimini oluşturmaktadır.  $\phi(\theta)$  ise enerji terimi olup, ML metriğe katkısı SNR’a bağlıdır. Buradan  $\theta$ ’nın kestirimi,

$$\hat{\theta} = \arg \max \left\{ \left| \gamma(\theta) \right| - \frac{SNR}{SNR - 1} \phi(\theta) \right\} \quad (2.29)$$

şeklinde hesaplanır.

Burada olabilirliğin logaritması fonksiyonu, dolayısıyla sistem performansını iki temel parametre etkiler. Bunlar sistemin CP uzunluğu  $N_{CP}$  ve SNR’a bağlı olan  $\rho$  sabitidir.

Toplam alt-taşıyıcı sayısının,  $N=1024$ , CP uzunluğunun  $N_{CP}=128$  ve SNR’ın 15 dB olduğu durumda, 100 örneklilik gecikmeye sahip bir kullanıcıya ait olabilirliğin logaritması fonksiyonu Şekil 2.17’de gösterilmektedir.



Şekil 2.17: Olabilirliğin logaritması fonksiyonu (ML metrik)

Şekilde görüldüğü gibi, metrik  $N$  ile periyodiktir ve maksimum değeri veren  $\theta$ , zaman kaymasının kestirimini,  $\hat{\theta}$ , vermektedir.

Bura bölümde çıkarılışı matematiksel olarak gösterilen, senkronizasyon fonksiyonları olarak adlandırdığımız  $\gamma(\theta)$  ve  $\phi(\theta)$ , daha kısa olarak anlatılan, diğer gözü kapalı metotlarda kullanılmaktadır.

#### 2.4.2.2. Muller Metodu

Beek'in ML metodunu zaman kestirimi için en iyi sonucu vermektedir. Fakat sinyalin ve gürültünün gücünün bilinmesi gerekmektedir. Buna karşın Muller'in metodunda böyle bir bilgiye ihtiyaç yoktur. Bunun karşılığında ise, bu metot sinyal-gürültü oranının düşük olduğu bölgede performansı da düşmektedir. Bu metoda MMSE (en küçük karesel hata) metodu olarak da adlandırılmaktadır [16].

Kullandığı metrik;

$$f_{Muller} = |\gamma(\theta)| - \frac{\phi(\theta) + \phi(\theta + N)}{2} \quad (2.30)$$

#### 2.4.2.3. Speth Metot

Karesel fark kestiricisi de adı verilen bu metodun kullandığı metrik aşağıdaki gibidir [17].

$$f_{Speth}(\theta) = \sum_{n=\theta}^{\theta+N_{CP}-1} |y(n) - y(n+N)|^2 \quad (2.31)$$

Yüksek SNR değerlerinde, bu metodun performansı, ML metot ile hemen hemen aynıdır.

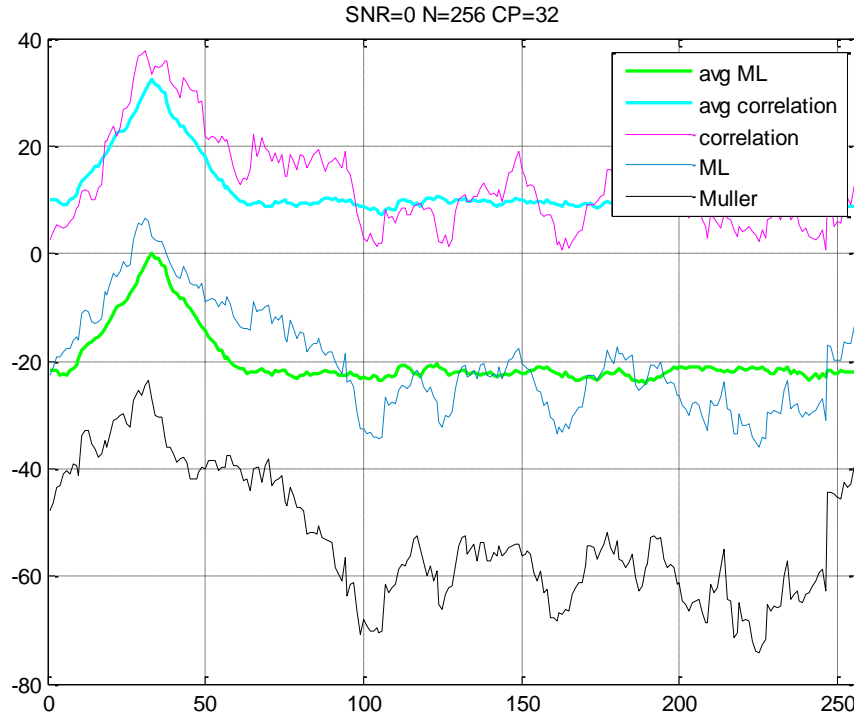
#### 2.4.2.4. Korelasyon Tabanlı Metot

Bu metot, başlangıçta metriklerin hesabı için kullanılmak üzere verilen, korelasyon fonksiyonunu metrik olarak kullanır. Tek kullanıcıli senaryoda, gözü kapalı kestirim metotların içinde en basiti olmasına karşılık, en kötü performansa sahiptir.

Kullandığı metot;

$$f_{Corr}(\theta) = |\gamma(\theta)| = \left| \sum_{n=\theta}^{\theta+N_{CP}-1} y(n)y^*(n+N) \right| \quad (2.32)$$

Aşağıdaki figürde aynı sistem parametreleri için, tüm metrikleri üst üste çizdirerek, gözü kapalı bu metotların performansları karşılaştırılmaktadır.



Şekil 2.18: Metriklerin üst üste çizdirilmesi

Metotların daha iyi karşılaştırılabilmesi için, belirli bir SNR aralığında her bir metot için Hatanın Karesel Ortalamasının Karakök Değeri hesaplanmıştır. Bu simülasyon sonuçları tezin bulgular kısmında yer almaktadır.

Tek kullanıcı OFDM sistemlerinin yapısı, avantajları ve dezavantajları üzerine durulan bu bölümde, daha çok OFDM sistemlerinin senkronizasyon problemi üzerine durulmuş, sebepleri ve etkileri açıklanan bu problemin çözümü üstüne yapılmış olan metotlar açıklanmıştır. Sistem performansını düşüren, veri destekli senkronizasyon yöntemler yerine, gözü kapalı yöntemler incelenmiştir ve en popüler CP'ye dayalı gözü kapalı metotlar kısaca açıklanmış ve kullandıkları metrikler verilmiştir.

Çoklu kullanıcı sistemlerdeki zamanlama problemini ele alan bu çalışmada, tek kullanıcı OFDM sistemlerinde kullanılan gözü kapalı senkronizasyon metotlarının var olan probleme uyarlanması ve geliştirilmesi üzerine gidilmiştir. Buna karşılık, hem çok-kullanıcı hem de tek kullanıcı sistemler için, senkronizasyon performansını arttıran, ortalama alma tekniği geliştirilerek, bu bölümde sözü edilen metrikler ile sifıra yakın hataların elde edileceği bulgular kısmında açıklanmıştır ve simülasyonlar ile bu kanıtlanmıştır.

### **3. MALZEME VE YÖNTEM**

#### **3.1. PROBLEM TARİFİ**

OFDMA tabanlı iki sistemin ele alındığı bu tezde, bir makro hücre ve yeni nesil gezgin iletişim sistemleri ile gündeme gelen daha küçük ve makro hücre ile aynı frekans bandını kullanan bir femto hücre ele alınmıştır. Femto hücre, hareketli kullanıcı ile aynı yerde bulunan yeni tip hücrelerdir. Bu yeni hücre tipi arttırılmış veri hızı, geliştirilmiş iç alan kapsama alanı ve azaltılmış ana-hat trafiği ile hem operatörlere hem de müşterilere büyük avantajlar sağlamaktadır. Buna karşın femto hücreler, makro hücre veya diğer femto hücre sistemlerinden kaynaklanan ortak kanal girişimi, frekans değiştirme (hand-off) gibi problemleri vardır [18].

Kendi kullanıcıları ile haberleşmesini devam ettiren makro hücrenin kullanmadığı veya ilgili femto hücreden çok uzakta bulunan bir kullanıcı tarafından kullanılan alt-taşıyıcı setini ikinci sistem olarak alan ve makro hücreye hiçbir etkisi bulunmayan femto hücre, kendi kullanıcıları ile haberleşme yapmak amacını gütmektedir. Aynı frekans bandındaki alt-taşıyıcı setlerini makro hücre ile kullanacak olan femto hücre, alt taşıyıcılar arasındaki dikliğin korunması ve ICI oluşmaması için makro hücreye senkronize olmak zorundadır. Aksi halde oluşan ICI, femto hücrenin kendisi için kullanmak üzere kolladığı, frekans bandının kullanılmayan bölümlerini etkileyecek ve makro hücre tarafından kullanılıyormuş gibi görünecektir. Bu da femto hücre sisteminin performansını etkileyecek, kendi kullanıcıları arasındaki bağlantı kesilecektir.

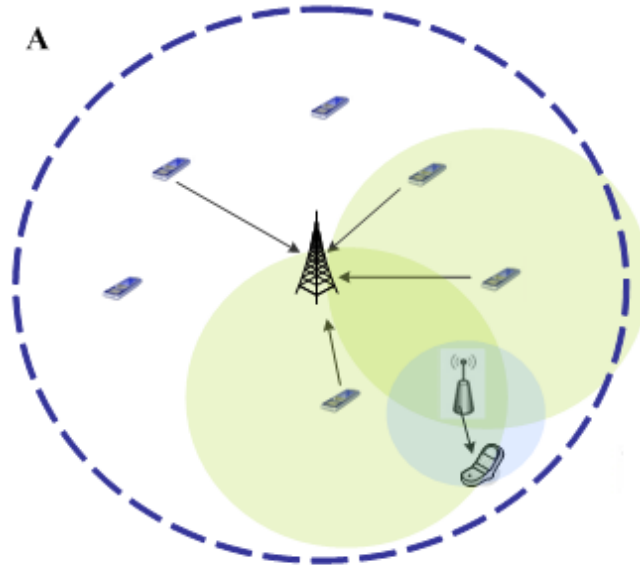
Bu çalışmada bir femto hücre sistemin, bir makro hücre sistemin UL'ine, makro hücre kullanıcıların alt-taşıyıcı bilgilerine sahip olmadan, gözü kapalı bir şekilde senkronizasyonu ele alınmıştır. Femto hücre sistemi, makro hücre mobil kullanıcılardan gelen bilgilerin decode edilmesiyle ilgilenmemektedir, buna rağmen femto hücreyi etkileyen ICI'yi minimize etmek amacıyla, UL'de çok-kullanıcılı sinyale efektif olarak senkronize olmak zorundadır.

Bu çalışmada, femto hücre sistemi etkileyen ICI'yi minimize edebilmenin, femto hücre sistemine ilk varan OFDMA sinyaline senkronize olmakla mümkün olabileceğini gösterildi ve mevcut gözükapalı senkronizasyon metotlarının performanslarının bu senaryo için geliştirildi. Ayrıca önerilen gözü kapalı senkronizasyon metodu için Ortalama Karesel Hatanın Karakökü (RMSE) elde edildi ve simülasyonlarla karşılaştırıldı.

### **3.2. ÇOK KULLANICILI OFDMA SİSTEMLERİNDE ZAMANLAMA SENKRONİZASYONU**

Daha önce de bahsedildiği gibi OFDMA tabanlı sistemlerde toplam alt-taşıyıcılar gruplandırılarak, alt kanallar haline getirilmekte ve sistemdeki kullanıcılara atanmaktadır. Yukarı bağ (UL) haberleşmesinde, makro hücre baz istasyonu, her kullanıcının gönderdiği sinyalleri toplu olarak almaktadır ve farklı kanallardan ve farklı gecikmelerle gelen bu sinyallerin hepsine ayrı ayrı senkronize olarak, yani herbirinin zaman kaymasını kestirerek, alt-taşıyıcılar arasındaki dikliği sağlamak zorundadır. Aksi halde, ICI oluşur ve kullanıcıların gönderdiği bilgileri demodüle edemez.

Aşağıdaki şekilde bir UL haberleşmesi yapan makro hücre sistemi gösterilmektedir.

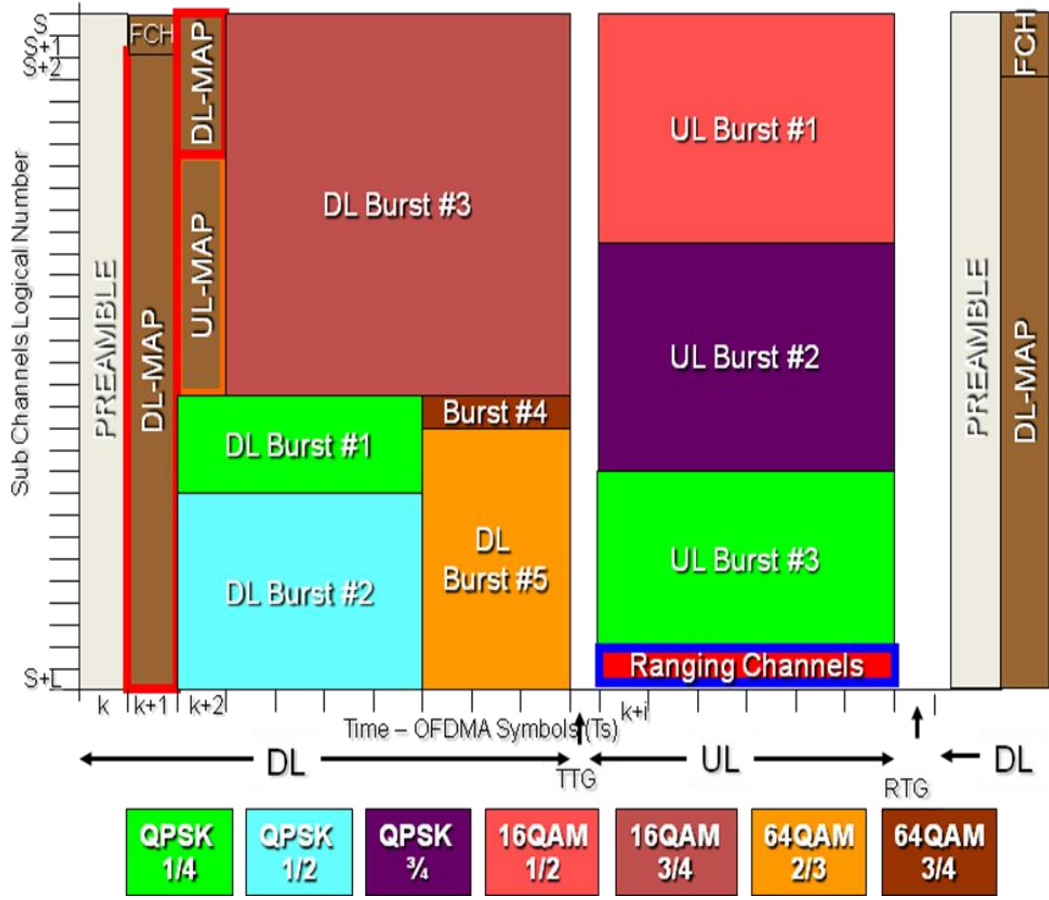


Şekil 3.1: Yukarı bağıda haberleşme yapan OFDMA tabanlı makro hücre sistemi

UL'de yapılan bu senkronizasyon işlemi, OFDM sistemlerindeki tek kullanıcıya duruma ve hatta çok kullanıcıya senaryoda DL'de gerçekleşmesi gereken senkronizasyona göre çok daha zor bir işlemdir. Bunun sebebi, baz istasyonunda her bir kullanıcıya ait zaman kaymasının ayrı ayrı kestirilmesinin gerekmesi ve daha önemlisi, sadece tek bir kullanıcıya ait zaman kaymasının yanlış kestirilmesinin diğer tüm kullanıcıları etkilemesidir.

Literatürde bu problem, zorluğundan dolayı daha çok veri destekli yöntemler ile ele alınmıştır.

Genel olarak bir makro hücre baz istasyonunun, UL'den aldığı çok-kullanıcı sinyaline, veri destekli yöntemler aracılığıyla senkronize olmasını, aşağıdaki bir OFDMA çerçeve modelini ele alarak daha iyi anlatabiliriz.



Şekil 3.2: OFDMA Veri Yapısı

Makro hücre baz istasyonu, bu yapı içerisinde bulunan uzaklık (ranging) kanallarını kullanarak, makro hücre içindeki kullanıcılarla senkronizasyonu sağlar. Şöyle ki, bu kanal vasıtasıyla baz istasyonu tarafından kullanıcılara gönderilen bir pilot sembolü sonucunda, tüm kullanıcılar aynı kanalı kullanarak baz istasyonuna bir cevap sinyali gönderirler. Bu cevap sinyallerini alan baz istasyonu, gerçek haberleşmeye başlamadan önce, her bir kullanıcıya ait zaman kaymasını hesaplar ve aynı alt-taşıyıcı setini kullanacak olan bu kullanıcıların sinyallerinin, aynı anda baz istasyonuna ulaşabilmesi için, her kullanıcının hangi zamanlarda verisini göndermesi gerektiğini belirler. Böylece alt-taşıyıcılar arasındaki diklik bozulmaz, ICI oluşmaz ve haberleşme yüksek bir performansla devam eder.

Buna karşın bilindiği gibi, veri destekli yöntemler sistemin, spektral verimliliğini düşürmektedir. Fakat çok-kullanıcı bir senaryoda gözü kapalı senkronizasyon yeni çalışılmaya başlanan bir konu olup, henüz literatürde derinlemesine incelenmemiştir.

[19]'de çok-kullanıcılı OFDM sistemi için zaman/frekans senkronizasyon metodu ele alınmış fakat her kullanıcının zaman kaymalarının bireysel olarak kestirilmesi için, kullanıcının sinyalleri frekans domeninde ayırma filtreleri kullanılarak birbirinden ayrılmıştır. Fakat bu yöntemin kullanılması için, OFDMA sistemindeki alt-taşıyıcılar kullanıcılara sürekli dağıtım metodu ile, yan yan yana olan alt-taşıyıcı seti verilmek suretiyle, mümkündür. Aksi halde sözü edilen gözü kapalı çok kullanıcılı zaman senkronizasyon metodu kullanılamaz. Burada amacın, kullanıcıların ilettiği bilgilerin baz istasyonu tarafından demodüle edilmesi olduğu unutulmamalıdır.

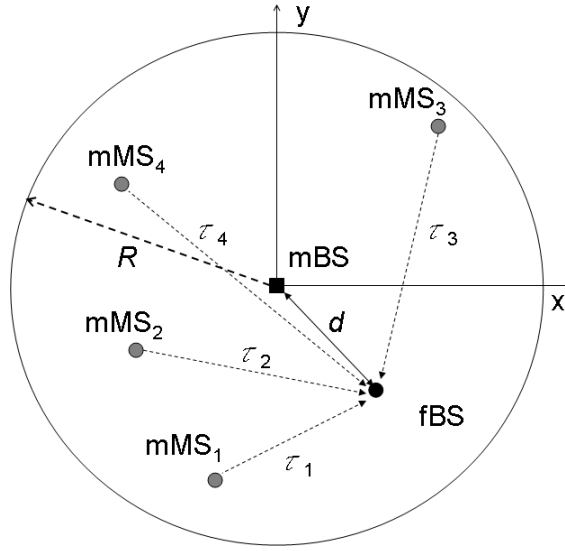
### **3.3. MAKRO HÜCRE İLE FEMTO HÜCRE ARASINDAKİ SENKRONİZASYON**

Sadece sistemin kapasitesini, kapsama alanını ve iç alanda veri hızını arttırmak amacıyla, aynı frekans bandını kullanan femto hücre ve makro hücre arasındaki zamanlama senkronizasyonu ise, sistemler arasında bir haberleşme mümkün olmayacağı için, pilot sembol gönderimi söz konusu olamayacağı için, gözü kapalı bir şekilde yapılması gerekmektedir. Bir OFDMA sisteminde, baz istasyonun kendi kullanıcıları ile UL'de haberleşme yapmak gibi genel bir problem için bile yeni yeni incelenmekte olan çok-kullanıcılı sistemlerde gözü kapalı zamanlama senkronizasyonu teknikleri, bu tezde ele alınan makro hücre ile femto hücre arasındaki UL'deki senkronizasyonun sağlanarak, girişimi minimize etmek ve böylece femto hücrenin boş olan spektrumları görüp, bunları kendi kullanıcıları ile haberleşmek gibi bir amaç daha önce çalışılmamış bir konudur ve bu tezde yapılan çalışma literatüre yeni bir katkı sağlamaktadır.

#### **3.3.1. Sistem Modeli**

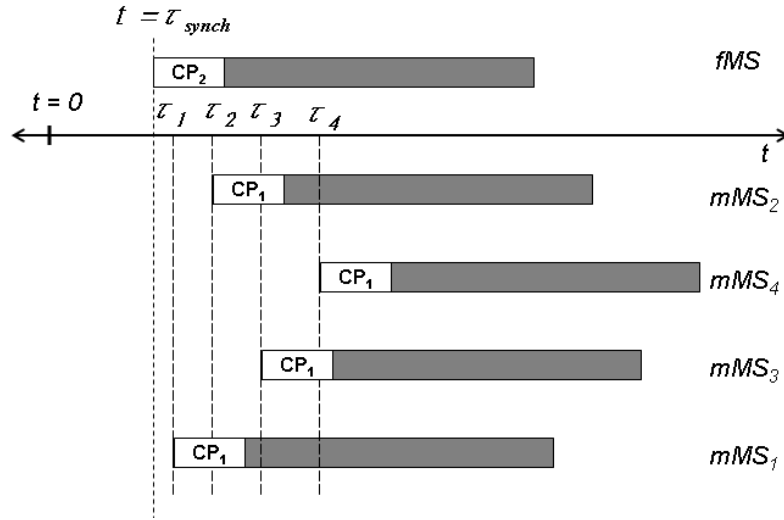
Makro hücre mobile istasyonlardan (mMSs) gelen yukarı-bağ (UL) sinyalleri makro hücre baz istasyonu (mBS) ile haberleşebilmek için yüksek güce sahip olan sinyallerdir ve bu sinyaller femto hücre'yi etkilemektedir. Bu sinyaller femto hücre baz istasyonuna (fBS) farklı gecikmelerle gelebilirler (Şekil 3.3). [10]'da ifade edildiği gibi, mobil istasyonlardan gelen sinyaller, femto hücre kullanıcının CP'si dışında varırsa, bu durum büyük bir ICI meydana getirir. Bu nedenle, makro hücre sisteminin yukarı-bağ'inden gelen ICI'yi önlemek veya minimize etmek için, fBS verimli bir şekilde makro hücre

sistemine senkronize olmalıdır. Ayrıca, makro hücre mobil istasyonları direk olarak femto hücre ile haberleşemediği için, senkronizasyon amacı ile herhangi pilot sembol iletimi yapamazlar. Bu sebeple, femto hücre sistemi, makro hücre sistemine gözü kapalı bir şekilde, sadece alınan UL çok-kullanıcı sinyalini kullanarak, senkronize olmak zorundadır.



Şekil 3.3: Farklı mMS'lerden gelen sinyaller, fBS'a farklı gecikmelerle varması

Şekil 3.3 'deki gibi, çoklu makro hücre mobil istasyonlarının UL sinyallerini makro hücre baz istasyonuna gönderdiği, kapsama alanı yarıçapı  $R$  olan bir makro hücre sistemi ele alalım. Bu sinyaller, makro hücre'den  $d$  kadar uzaklıkta olan femto hücreye eşzamansız olarak varırlar.  $i$ . mMS'den iletilen sinyalin, femto hücre baz istasyonuna varış süresi olarak  $\tau_i$  ile ifade edilsin. Femto hücre baz istasyonunda, femto hücre mobil istasyonlardan alınan sinyallerle birlikte, alınan tüm sinyallerin zaman domeninde gösterimi şekil 3.4'de olduğu gibidir. mMS'lerden gelen girişimi önlemek için, femto hücre mobil istasyonları, tüm makro hücre mobil kullanıcılardan farklı alt taşıyıcılar kullanmak durumundadır. (Eğer mMS'ler femto hücre'den çok uzakta ise, bu istasyonların kullandığı alt taşıyıcılar femto hücre tarafından kullanılabilir.)



Şekil 3.4: mMS sinyallerinin fBS'ye farklı gecikmelerle varışının zaman domeni sunumu

Ayrıca ICI' den kaçınmak için, femto hücre mobil kullanıcıların femto hücre baz istasyonuna varış süreleri olan  $\tau_{synch}$  yaklaşık olarak tasarlanmalıdır.

$T_{CP}$ , femto hücre sistemin CP uzunluğunu ifade etmek üzere, femto hücre baz istasyonu, kendisine ulaşan fMS'lerden gelen sinyalleri demodüle edebilmek için, öncelikle elde edilen sinyalin  $\tau_{synch}$  ile  $\tau_{synch} + T_{CP}$  arasındaki kısmını atar, daha sonra,  $N$  femto hücre sinyalinin yararlı sembol süresini ifade etmek üzere,  $\tau_{synch} + T_{CP}$  ile  $\tau_{synch} + T_{CP} + T$  arasındaki kısmın FFT'sini alır. Eğer herhangi bir mMS sinyali, femto hücre' in CP aralığından sonra femto hücre' e ulaşırsa, femto hücre ICI tarafından etkilenir. Bu durum göz önünde alınarak  $\tau_{synch}$  noktasının ICI' i minimize elde edilmesi, daha sonraki bölümlerde açıklanacaktır.

### 3.3.1.1. Sinyal Modeli

Hem makro hücre hem de femto hücre sistemleri OFDMA tabanlı sistemler oldukları için, onlara ait sinyaller aynı yolla modellenirler. Ayrıca, DL ve UL sinyalleri frekans çizelgeleme haricinde birbirlerine benzer oldukları için, sadece UL sinyal modeli verilecektir.

UL'de  $N_U$  tane kullanıcısı olan bir OFDMA sistemi ele alalım. Vericide  $i$ . kullanıcının örneklenmiş zaman domeni sinyali aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$x_i(m) = \sqrt{P_{tx,i}} \sum_{k \in \Gamma_i} X_i^{(m)}(k) e^{j \frac{2\pi kn}{N}}, \quad -N_{cp} \leq n \leq N \quad (3.1)$$

Bağıntıda yer alan  $m$ , sembol indeksini,  $P_{tx,i}$   $i$ . kullanıcının her bir sembolü için toplam iletilen gücü,  $k \in \Gamma_i$  alt taşıyıcı indeksini,  $\Gamma_i$ ,  $N$  toplam alt taşıyıcı içinde,  $i$ . kullanıcıya atanan alt taşıyıcı setini,  $N_{CP}$ , CP uzunluğunu, ve  $X_i^{(m)}(k)$  ise  $i$ . kullanıcının  $m$ . sembolünün  $k$ . alttaşıyıcı üzerinde taşınan kısmını ifade eder. Toplamda zaman domeninde alınan sinyal, herbiri farklı çokyollu kanallarda yayılan ve alıcıya,  $\tau_i$   $i$ . kullanıcının yayılım gecikmesi olmak üzere,  $d_i = [N\tau_i / T]$  gecikmesi ile ulaşan farklı kullanıcılara ait sinyallerin toplamı şeklindedir. Frekans kaymasına uğramadığı varsayılan bu alınan toplam sayısal sinyal aşağıdaki gibi ifade edilir;

$$y(n) = \sum_{i=1}^{N_U} y_i(n - d_i) + w(n) \quad (3.2)$$

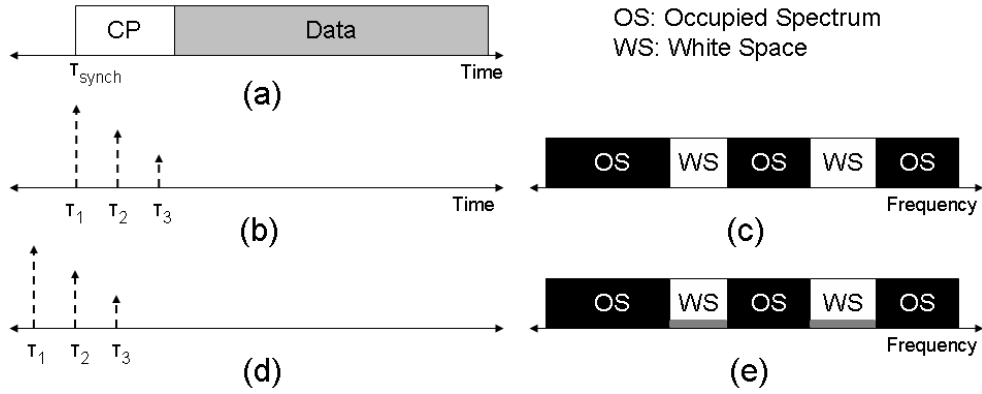
$$y_i(n) = \sqrt{P_{rx,i}} \sum_{l=0}^{L-1} h_i^{(m)}(l) \times \sum_{m=-\infty}^{\infty} x_i^{(m)}(n - D_{l,i} - m(N + N_{CP})) \quad (3.3)$$

Burada  $w(n)$  AWGN gürültüsünü,  $L$  çok yollu kanalın dal sayısını,  $h_i^{(m)}(l)$ ,  $i$ . kullanıcı için kanalın  $l$ . çok yol impuls cevabını, ve  $D_{l,i} = [T * \tau_{l,i} / N]$  iken  $\tau_{l,i}$  ise  $i$ . kullanıcı için, çok-yollu kanalın  $l$ . yolunun gecikmesini ifade eder.

### 3.3.1.2. Femto hücre ile Makro hücre sistemleri arasındaki Eşzamanlamanın Etkisi

Senkronizasyon noktasının, makro hücre mobil kullanıcıların femto hücre üzerine yaptığı ICI'in miktarına etkisi Şekil 3.5'de gösterildi. Burada OS, kullanılmakta olan spektrum, macrocell kullanıcıları tarafından kullanılmakta, WS, beyaz bölge, spektrumu ise femtocell kullanıcılar tarafından kullanılacak olan spektrumu ifade etmektedir. (Bu çalışmada beyaz bölge birincil sistem olan macrocell sistemi tarafından kullanılmayan alt taşıyıcıları ifade etmektedir.)

Şekil 3.5 a)'da femto hücre baz istasyonu tarafından alınan bir femto hücre mobil istasyonu sinyalini göstermektedir. Ayrıca sembolün "Data" ve "CP" parçalarını belirtmektedir.



Şekil 3.5: Eğer alınan sinyaller CP içerisinde gelirse, ICI oluşmaz. Eğer sinyallerden bazıları CP'den önce veya sonra gelirse, bu kullanılmayan alt taşıyıcılar için ICI oluşturur.

Şekil 3.5 b),  $\tau_3 - \tau_1$  ile gösterilen, son ulaşan makro hücre mobil istasyonun sinyali ile ilk ulaşan istasyonun sinyalinin arasındaki zaman farkının, Şekil 3.5 a)'da gösterilen femto hücre sinyalinin CP kısmından daha küçük olduğu durumu sembolize etmektedir. Bu nedenle, bu durum için femto hücre ilk gelen makro hücre mobil istasyonun sinyaline senkronize olursa ( $\tau_{synch} = \tau_1$ ), tüm diğer makro hücre mobil istasyonlardan gelen sinyaller, femto hücre sinyalinin CP'si içinde kalacaklardır. Bu da, Şekil 3.5 c)'de gösterildiği gibi, spektrumun beyaz bölgelerinde ICI'in gözlenmemesini sağlayacaktır. Diğer taraftan Şekil 3.5 d)'de gösterildiği gibi, eğer femto hücre ilk gelen kullanıcının sinyaline senkronize olamazsa, bu sinyal CP dışında kalabilir. Bu nedenle, Şekil 3.5 e)'de gösterildiği gibi spektrumdaki beyaz bölge ICI'den etkilenecektir. Bu da femto hücre tarafından kullanılan beyaz bölgelerin, aslında kullanılmayan bu bölgelerin, kullanılır olduğu sonucuna varılmasına neden olacaktır.

Bu nedenle femto hücre ile makro hücrenin senkronizasyonu problemi, femto hücrenin, makro hücre mobil istasyonlarından gelen, ilk kullanıcıya senkronize olma problemine dönüşmektedir. Tek kullanıcı OFDM sistemlerinden farklı olarak, femto hücreye varan sinyal, bir çoklu kullanıcı OFDMA sinyalidir. Bu toplu sinyal içinden, ilk gelen kullanıcıya ait olan zaman kaymasının,  $\tau_1$ , gözü kapalı metotlarla kestirimi, daha zor bir problemdir. Çoklu kullanıcı sistemler için gözü kapalı zamanlama senkronizasyonu problemi, yeni yeni çalışılmaya başlanmış bir konu olup, makro hücre mobil kullanıcılarına atanan alt-taşıyıcı setlerinin de bilinmediği bu senaryoda, kullanılacak bir metot literatürde bulunmamaktadır. Bu sebeple, problemin çözümü için, tek kullanıcı basit senaryo için elde edilmiş gözü kapalı metotlar, bu probleme uygun hale getirilerek yeni bir metot sunulmuştur.

$\tau_3 - \tau_1 > T_{CP}$  olduğu durumda, bir femto hücre mobil istasyonu, ilk gelen makro hücre mobil istasyona senkronize olduğu durumda bile, CP aralığı dışında gelen diğer makro hücre kullanıcı sinyalleri, beyaz bölgede ICI oluşmasına neden olacağı göz önünde bulundurulmalıdır. Bu durumda, oluşan ICI'yi minimize etmek için optimum bir senkronize noktası bulma problemi, daha sonra çalışılacaktır.

### 3.3.2. Çok Kullanıcı Senaryoda RMSE'nin Teorik Olarak Türetilmesi

#### 3.3.2.1. Korelasyon Metriğinin İstatistiği

Korelasyon metriğinin istatistiği çok kullanıcı senaryosu için aşağıdaki gibi türetilmiştir. Kanalin çok yollu olmadığı ve bundan sonraki çıkarımlarda, tek yollu AWGN alındığı göz önünde bulundurulmalıdır.

Mevcut gözü kapalı senkronizasyon metotları içinde, karmaşıklığı en fazla olmasına rağmen, en iyi performansa sahip olanın ML metot olduğu 2. Bölümde açıklanmasına rağmen, işlem karmaşıklığı açısından, analizler korelasyon metodu için yapılmıştır.

Burada korelasyon metriği modifiye edilmeden, direk olarak çok kullanıcı senaryoya uygulanması durumundaki istatistiği incelenmektedir.

(3.2)'de verilen çok-kullanıcı sinyal, korelasyon metriğinde yerine konulur ve aşağıdaki eşitlik elde edilir.

$$\gamma(\theta) = \sum_{n=\theta}^{\theta+N_{CP}} y(n)y^*(n+N) \quad (3.4)$$

$$= \sum_{n=\theta}^{\theta+N_{CP}} \left( \sum_{i=1}^{N_u} y_i(n-d_i) + w(n) \right) \times \left( \sum_{i=1}^{N_u} y_i(n-d_i+N) + w(n+N) \right)^* \quad (3.5)$$

Bu eşitliği düzenlediğimizde, aşağıdaki eşitlik ortaya çıkmaktadır.

$$\gamma(\theta) = s_1(\theta) + w_1(\theta) + w_2(\theta) + w_3(\theta) + w_4(\theta) \quad (3.6)$$

$$s_1(\theta) = \sum_{n=\theta}^{\theta+N_{CP}} \sum_{i=1}^{N_u} y_i(n-d_i)y_i^*(n-d_i+N) \quad (3.7)$$

$$w_1(\theta) = \sum_{n=\theta}^{\theta+N_{CP}} w(n) \sum_{i=1}^{N_u} y_i^*(n-d_i+N) \quad (3.8)$$

$$w_2(\theta) = \sum_{n=\theta}^{\theta+N_{CP}} w^*(n+N) \sum_{i=1}^{N_u} y_i(n-d_i) \quad (3.9)$$

$$w_3(\theta) = \sum_{n=\theta}^{\theta+N_{CP}} \sum_{i=1}^{N_u} \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{N_u} y_i(n-d_i) y_j^*(n-d_j+N) \quad (3.10)$$

$$w_4(\theta) = \sum_{n=\theta}^{\theta+N_{CP}} w(n) w^*(n+N) \quad (3.11)$$

Bu toplamda, (3.7) gürültüden ve çoklu-kullanıcı girişiminden etkilenmemiş arzu edilen kısmı, (3.8)-(3.11) eşitlikleri ise, sırasıyla gürültü-çarpı girişim ((3.8)-(3.9)), girişim-çarpı girişim ve gürültü-çarpı gürültü terimlerini ifade eder.

(3.8)-(3.11) gürültü terimlerini istatistiği aşağıdaki gibi türetilir.

$$w_1(\theta) \sim \mathbf{N}\left(0, N_{CP} \sigma^2 \sum_{i=1}^{N_u} \tilde{\sigma}_i^2\right) \quad (3.12)$$

$$w_2(\theta) \sim \mathbf{N}\left(0, N_{CP} \sigma^2 \sum_{i=1}^{N_u} \tilde{\sigma}_i^2\right) \quad (3.13)$$

$$w_3(\theta) \sim \mathbf{N}\left(0, N_{CP} \sum_{i=1}^{N_u} \sum_{j=1}^{N_u} \tilde{\sigma}_i^2 \tilde{\sigma}_j^2\right) \quad (3.14)$$

$$w_4(\theta) \sim \mathbf{N}(0, N_{CP} \sigma^4) \quad (3.15)$$

Burada  $\sigma_i^2 = P_{rx,i}$  yani alınan  $i$ . kullanıcıya ait sinyalin gücünü ifade eder. Diğer taraftan arzu edilen kısmın (3.7), yoğunluk fonksiyonu şu şekilde yazılabilir.

$$s_1(\theta) \sim \mathbf{N}\left(\sum_{i=1}^{N_u} E\{s_{1,i}(\theta)\}, \sum_{i=1}^{N_u} \text{Var}\{s_{1,i}(\theta)\}\right) \quad (3.16)$$

Burada;

$$E\{s_{1,i}(\theta)\} = \begin{cases} \tilde{\sigma}_i^2 N_{CP} \left(1 - \frac{|\theta - d_i|}{N_{CP}}\right), & \text{if } |\theta - d_i| \leq N_{CP} \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3.17)$$

$$\text{Var}\{s_{1,i}(\theta)\} = \begin{cases} (2N_{CP} - |\theta - d_i|) \tilde{\sigma}_i^4, & \text{if } |\theta - d_i| \leq N_{CP} \\ N_{CP} \tilde{\sigma}_i^4, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3.18)$$

şeklindedir.

### 3.3.2.2. Ortalama Karesel Hata (MSE) için Bir Yaklaşım

Birinci kullanıcıya gözü kapalı bir şekilde senkronizasyon, birinci kullanıcının zaman kaymasının gözü kapalı bir şekilde kestirilmesi, için yaklaşık RMSE hesaplaması, bir önceki alt başlıkta verilen, alınan sinyalin istatistikleri kullanılarak elde edilir. Korelasyon metriği kullanılarak,  $\theta$  indexi ile gösterilen noktaya senkronizasyon olasılığı aşağıdaki gibi ifade edilir. (Burada  $P(\rho) | \gamma(j)$  'lerin her bir  $j$  için korele olmadığını varsayıyoruz)

$$P(\hat{\theta} = \theta) = \int_{\rho=0}^{\infty} P(\rho = |\gamma(\theta)|) \times \prod_{\substack{j=1 \\ j \neq \theta}}^N P(\rho = |\gamma(j)|) d\rho \quad (3.19)$$

Burada

$$P(\rho = |\gamma(\theta)|) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{tot}^2} \exp\left(-\frac{(\rho - \gamma(\theta))^2}{2\sigma_{tot}^2}\right) + \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{tot}^2} \exp\left(-\frac{(\rho + \gamma(\theta))^2}{2\sigma_{tot}^2}\right) \quad (3.20)$$

$\sigma_{tot}^2$ , (3.12) ile (3.15) terimlerindeki gürültülerin varyanslarının toplamını ifade etmektedir.

Ayrıca (3.19)'daki terim, şu şekilde yazılabilir;

$$P(\rho = |\gamma(\theta)|) = 1 - Q\left(\frac{\rho - \gamma(j)}{\sigma_{tot}}\right) - Q\left(\frac{\rho + \gamma(j)}{\sigma_{tot}}\right) \quad (3.21)$$

Burada  $Q$ , hata fonksiyonunu ifade etmektedir.

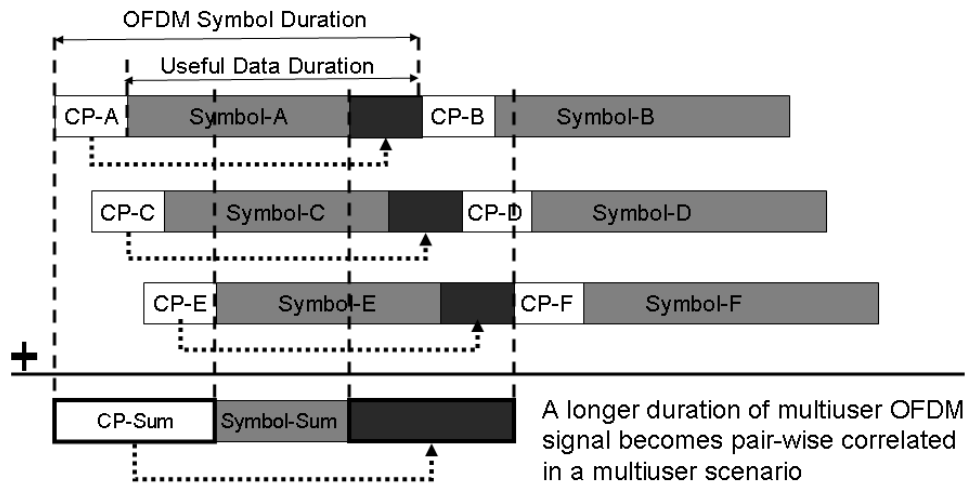
$$Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^{\infty} \exp(-x^2/2) \quad (3.22)$$

Buna göre, birinci kullanıcının zaman kaymasına senkronize olmanın, ortalama karesel hatanın karakök değeri (RMSE) şu şekilde yazılır;

$$RMSE(d_1) = \left[ \sum_{\theta=1}^N P(\hat{\theta} = \theta) |\theta - d_1|^2 \right]^{1/2} \quad (3.23)$$

### 3.3.3. Korelasyon Metriğinin Çok-Kullanıcı Senaryo için Geliştirilmesi

(3.5)'de hesaplanan korelasyon metriğinde, OFDM sinyalinden  $N_{CP}$  örneklilik parçalar alınmaktaydı. Bunun sebebi, korelasyon metriği hesaplanırken, OFDM sembolünden alınan  $N_{CP}$  kadarlık parçalar birbiri ile korele iken , diğer parçaların korele olmamasıdır. Buna rağmen, çoklu kullanıcı durumunda, OFDM sembolünden alınan daha büyük parçalar parçalı korelasyona sahiptir. Bu nedenle, korelasyon metriği hesaplanırken, çok kullanıcı durumunda daha uzun korelasyon pencereleri gerekmektedir.



Şekil 3.6: Çok kullanıcı OFDM sinyalinden alınan daha büyük parçaların birbiri ile nasıl pairwise ilişkili olduğunun gösterimi (3 kullanıcı bir senaryoda)

Şekil 3.6 incelendiğinde, birbiri ile karşılıklı ilişkiye sahip olan kısmının  $N_{CP}$  kadar değil, femto hücreye varan, son makro hücre kullanıcısının gecikmesi,  $\tau_{son}$ , ile ilk varan kullanıcının gecikmesi,  $\tau_{ilk}$ , ve  $D_{max} = \tau_{son} - \tau_{ilk}$  olmak üzere,  $N_{corr} = N_{CP} + D_{max}$  kadarlık parçalar olduğu görülmektedir.

Bu durumda, çok kullanıcılu bu senaryoda, femto hücrenin, makro hücrenin mobil kullanıcıları tarafından meydana gelen ICI'yi minimize etmek amacıyla, birinci kullanıcıya senkronize olma amacını gerçekleştirmek amacıyla kullanılan CP'ye dayalı metotlar, bu şekilde geliştirilerek probleme uygunmaktadır.

Yeni durumda, korelasyonun  $N_{corr} = N_{CP} + D_{max}$  sample kadarlık bir parça üzerinden alındığını senaryoda, oluşan korelasyon metriğinin istatistikleri aşağıdaki gibi hesaplanır.

Bu durumda (3.5) eşitliği, aşağıdaki gibi yazılır,

$$\begin{aligned} \gamma(\theta) &= \sum_{n=\theta}^{\theta+N_{corr}} y(n)y^*(n+N) \\ &= \tilde{s}_1(\theta) + \tilde{w}_1(\theta) + \tilde{w}_2(\theta) + \tilde{w}_3(\theta) + \tilde{w}_4(\theta) \end{aligned} \quad (3.24)$$

$$\tilde{w}_1(\theta) \sim N\left(0, N_{corr}\sigma^2 \sum_{i=1}^{N_u} \tilde{\sigma}_i^2\right) \quad (3.25)$$

$$\tilde{w}_2(\theta) \sim N\left(0, N_{corr}\sigma^2 \sum_{i=1}^{N_u} \tilde{\sigma}_i^2\right) \quad (3.26)$$

$$\tilde{w}_3(\theta) \sim N\left(0, N_{corr} \sum_{i=1}^{N_u} \sum_{j=1}^{N_u} \tilde{\sigma}_i^2 \tilde{\sigma}_j^2\right) \quad (3.27)$$

$$\tilde{w}_4(\theta) \sim N(0, N_{corr}\sigma^4) \quad (3.28)$$

Bu durumda arzu edilen terimin, dağılımı şu şekilde yazılabilir.

$$\tilde{s}_1(\theta) \sim N\left(\sum_{i=1}^{N_u} E\{\tilde{s}_{1,i}(\theta)\}, \sum_{i=1}^{N_u} Var\{\tilde{s}_{1,i}(\theta)\}\right) \quad (3.29)$$

Bu eşitlikte ortalama ve varyans eşitlikleri de aşağıdaki gibidir;

$$E\{\tilde{s}_{1,i}(\theta)\} = \left. \begin{array}{l} 0 \\ \sigma_i^2 N_{CP} \left(1 - \frac{d_i - D_{\max} - \theta}{N_{CP}}\right) \\ \sigma_i^2 N_{CP} \\ \sigma_i^2 N_{CP} \left(1 - \frac{\theta - d_i}{N_{CP}}\right) \\ 0 \end{array} \right\} \begin{array}{l} , \theta \leq d_i - N_{corr} \\ , d_i - N_{corr} \leq \theta \leq d_i - D_{\max} \\ , d_i - D_{\max} \leq \theta \leq d_i \\ , d_i \leq \theta \leq d_i + N_{CP} \\ , d_i + N_{CP} \end{array} \quad (3.30)$$

$$Var\{\tilde{s}_{1,i}(\theta)\} = \left. \begin{array}{l} N_{corr} \tilde{\sigma}_i^4 \\ \tilde{\sigma}_i^4 (2N_{corr} + \theta - d_i) \\ \tilde{\sigma}_i^4 (N_{corr} + N_{CP}) \\ \tilde{\sigma}_i^4 (d_i + N_{CP} - \theta + N_{corr}) \\ N_{corr} \tilde{\sigma}_i^4 \end{array} \right\} \begin{array}{l} , \theta \leq d_i - N_{corr} \\ , d_i - N_{corr} \leq \theta \leq d_i - D_{\max} \\ , d_i - D_{\max} \leq \theta \leq d_i \\ , d_i \leq \theta \leq d_i + N_{CP} \\ , d_i + N_{CP} \end{array} \quad (3.31)$$

(3.12)-(3.15) ‘teki gürültü değerleri ile kıyaslandığında, geliştirilmiş bu metotdaki girişim gürültü varyansları (3.25)-(3.28) daha büyük olmasına rağmen, hesaplanan korelasyon metriğinin uç noktası, birinci kullanıcının zaman kayması değerine daha yakın olduğu için, amaçlanan, birinci kullanıcıya ait olan zaman kaymasının kestiriminde, daha iyi sonuçlar alınmıştır. Bu durum bulgular bölümde, tek kullanıcı senaryo için kullanılan metotlar ile, bunların geliştirilmesi ile elde edilen yeni metodun, metriklerinin zaman domenindeki çizimleri ile açıkça görülmektedir.

Bu çalışmada, en basit haliyle femto hücrenin, makro hücreye senkronize olma problemi için geliştirilen yeni metot, eski gözü kapalı metotların bu probleme göre geliştirilmiş olup, genel mantık, bahsi geçen tüm metriklerde kullanılan korelasyon pencere aralığının belli oranda arttırılması ile elde edilmiştir. Dikkat edilmesi gereken konu, bu pencerenin geliştirilme oranının, femto hücreye UL’den ilk ve en son gelen makro hücre kullanıcılarının gecikmelerinin farkı kadar,  $D_{\max}$ , olmasıdır. Pencere miktarının neden bu oranda arttırılması gerektiği bu bölümde açıkça anlatılmıştır.

#### 4. BULGULAR

Senkronizasyon problemi tüm haberleşme sistemlerinde her zaman var olan bir problemdir. Yüksek veri hızı, kanalın çok yolluk etkisinden az etkilenme, denkleştiri karmaşıklığının az olması, semboller arası girişime yapısı gereği karşı dirençli olması sebepleri ile, OFDM son yıllarda çok popüler bir metot olup yeni nesil gezgin iletişim sistemlerinin hava arayüzü olarak kullanılmaya başlamıştır. Bütün dünyada yaygın olarak kullanılan WCDMA'e dayalı 3G sistemleri bile, geliştirilmiş sistemlerinde OFDM tabanlı oluşturma kararı almışlardır. Tezde bahsi geçen üstün üçüncü nesil sistemleri de, çok erişimli OFDM olarak bilinen OFDMA'ı hava arayüzü olarak seçmişlerdir. OFDM'in avantajlarının yanında, en büyük dezavantajı, senkronizasyon hatalarına olan duyarlılığıdır. Bu sebeple bu popüler yöntemin senkronizasyon problemlerine yönelik bir çok çalışma yapılmıştır.

Bu kısımda, öncelikle tek kullanıcı OFDM sistemleri için yapılmış olan ve 2. Bölümde ayrıntıları ile açıklanan gözü kapalı metotların performans karşılaştırmaları yapılmış, CP uzunluklarının, kullanıcıya atanan alt taşıyıcı sayısının bu metotlar üzerine etkisi incelenmiş ve bilgisayar simülasyonları ile gösterilmiştir. Literatürde var olan bu metotların, performanslarının geliştirilmesi için ise ortalama alma yöntemi uygulanmış ve bu basit yöntemle, bu gözü kapalı senkronizasyon metotlarının performanslarının artışı bilgisayara simülasyonları ile gösterilmiştir.

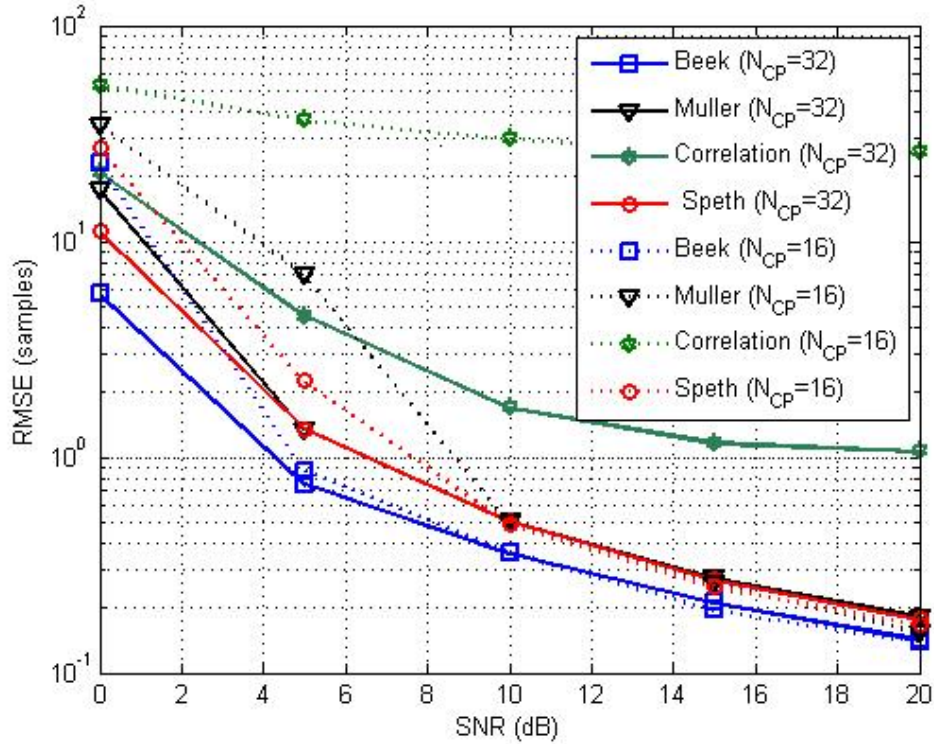
İkinci kısmında ise, tezin ana konusu olan çok-kullanıcı OFDM sistemleri de diyebileceğimiz OFDMA sistemlerinin UL'inde senkronizasyon problemi ele alınmış ve literatürde bu problem için çok fazla incelenmeyen gözü kapalı senkronizasyon metodu üzerine çalışılmıştır. İkisi de OFDMA tabanlı olan bir makro hücre ile aynı bölgede bulunan bir femto hücre sistemi ile ele alınmış ve literatürde incelenen, ileticiden gönderilen bilgilerin en hatasız bir şekilde elde edilmesi amacını güden senkronizasyon metotlarından farklı olarak, femto hücrede makro hücredeki mobil istasyonların UL sinyallerinden dolayı oluşan ICI'yi minimize etmek amacı ile senkronizasyon problemlerine yaklaşmıştır. Femto hücreyi etkileyen ve sistem

performansını düşüren ICI'yi minimize etmenin, femto hücrenin makro hücre kullanıcılarından ilk ulaşan yani en baskın kullanıcıya senkronize olması gerektiği bulunmuştur. Femto hücre ile makro hücre arasında her hangi bir haberleşmenin mümkün olamayacağı bu senaryoda yapılması gözü kapalı bir senkronizasyon metodu gerekmiş, ilk kullanıcıya gözü kapalı bir şekilde senkronizasyonu sağlayan bir algoritma geliştirilmiştir. Ayrıntıları 3. Bölümde var olan metoda ilişkin, bilgisayar simülasyonları bu bölümde verilmiştir.

#### 4.1. TEK KULLANICILI OFDM SİSTEMLERİNDEKİ GÖZÜ KAPALI SENKRONİZASYON METOTLARIN PERFORMANSLARI

##### 4.1.1 RMSE Analizi

Literatürde bulunan, tek kullanıcı OFDM sistemleri için gözü kapalı senkronizasyon tekniklerinin performanslarının daha iyi karşılaştırılabilmesi için yapılan Monte Carlo simülasyonları sonucunda, 2. Bölümde ayrıntıları ile anlatılan her bir metot için Ortalama Kareysel Hatanın Karakökü (RMSE) değerleri, farklı SNR değerlerinde hesaplanmış ve aşağıdaki figürde gösterilmiştir.



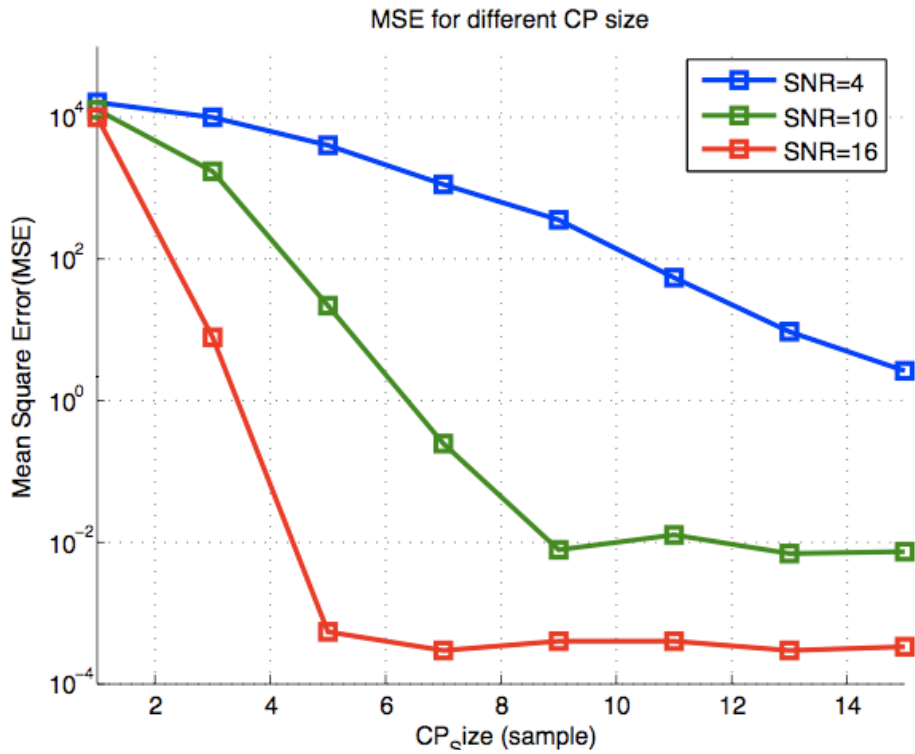
Şekil 4.1: Gözü kapalı metotlar için RMSE analizleri

Burada ayrıca CP uzunluğu arttıkça, metotların performanslarının da arttığı ve en iyi sonucu ML metotun verdiği açıkça görülmektedir.

3000 iterasyon yapılarak elde edilen monte karlo simulasyonunda kullanılan sistem parametreleri olarak; tek kullanıcıli sistemin toplam alt-taşıyıcı sayısı, 256, kullanıcının zaman kayması, 32 örnek, CP uzunluğu 16 ve 32 örnek olarak alınmıştır. Kanalin tek yollu AWGN olduğu varsayılmıştır.

#### 4.1.2. CP Etkisi

Şekil 4.1'de sistem performansı üzerine etkisi görülen CP uzunluğunun, en iyi performansı veren ML metot üzerine etkisi, farklı CP değerleri için hesaplanan MSE değerleri ile aşağıdaki şekilde görülmektedir. Kanalin tek yollu AWGN olduğu varsayılmıştır.



Şekil 4.2: CP uzunluğunun ML metot üzerine etkisi

Şekilden de görüleceği üzere, CP uzunluğunun ML metot üzerine etkisi belli bir CP eşik değerinden sonra, kaybolmaktadır. Bu eşik değer SNR değerinin artması ile azalmaktadır. Bu nedenle OFDM sistemlerinde, zamanlama senkronizasyon performansının artırılmasına, artırılan CP uzunluğunun belli bir değerden sonra etkisi

kalmamaktadır. Bu durum Şekil 4.1’de aynı metot için iki farklı CP değerinden hesaplanan RMSE eğrilerinin belli bir SNR değerinde kesişmesinden de anlaşılabilir. Simulasyonlarla gösterilen bu durum [ ]Beek (1997) tarafından kanıtlanmıştır.

#### 4.1.3. Alt-taşıyıcı Sayısı Etkisi

Daha önce de açıklandığı gibi, OFDM sistemlerindeki kullanıcı, sistemin tüm alt-taşıyıcı setini kullanarak veri iletişimi yapar. Buna karşın OFDMA sistemlerinde sistemdeki kullanıcılar, toplam alt-taşıyıcı sayısını paylaşırlar.

Tek kullanıcı OFDM sistemlerinde kullanılan bu gözü kapalı senkronizasyon metotlarının, çok kullanıcı OFDMA sistemlerinde direk olarak kullanılamamasının en büyük nedeni, bu metotların performansının kullanıcıya atanan alt-taşıyıcı sayısı ile doğru orantılı olmasıdır.

Bu metotların performansının, azalan alt-taşıyıcı sayısı ile azalmasının sebebi,  $x(n)$  iletilen veri setinin örnekleri arasındaki korelasyon miktarının, azalan alt-taşıyıcı sayısı ile artmasıdır. Şöyle ki, metriklerin hesabında kullanılan  $\gamma(\theta)$  fonksiyonu, korelasyon metriği, alınan  $y(n)$  OFDM sembolünün sadece CP kısmı ile OFDM sembolünün son kısmının ilintili olduğu, diğer kısımları ise ilintisiz olduğu varsayılmıştır. Bu varsayımın yapılabilmesi için merkezi limit teoremine göre, kullanıcıya ait alt-taşıyıcı sayısının büyük olması gerekmektedir. Fakat OFDMA sistemlerinde kullanıcılar toplam alt taşıyıcıları paylaştıkları için, kullandıkları alt-taşıyıcı sayısı azalacak dolayısı ile UL’den gönderilen  $x(n)$  Gauss dağılımlı olamayacak ve a her biri için alınan  $y(n)$  sembolünün CP kısımları dışındaki bölgedeki ilinti artacaktır.

Matematiksel analizle bu korelasyonu her iki durum için aşağıdaki gibi gösterilebilir. Zamanda örnek alınmış OFDMA sinyalinin

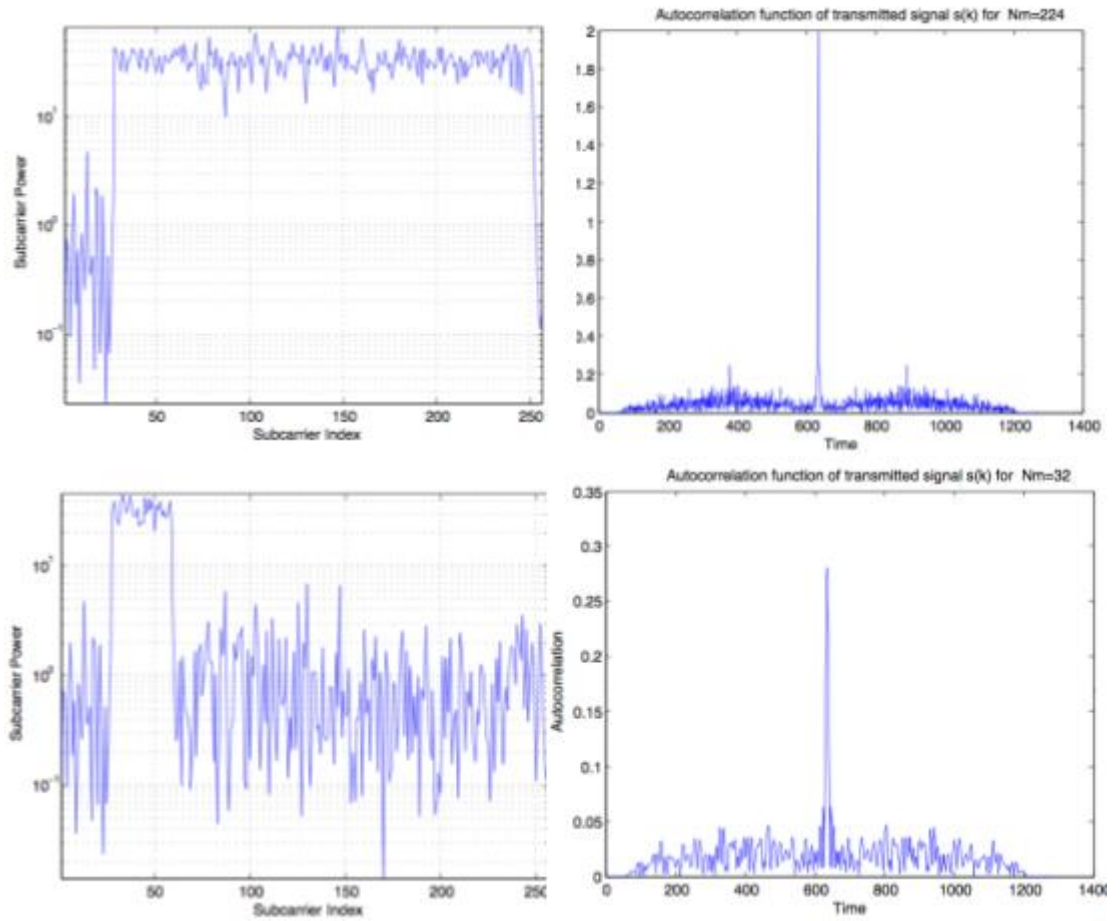
$$x_n = \sum_{k=M_0}^{M+M_0-1} X_k e^{j \frac{2\pi k}{N} n} \quad (4.1)$$

şeklinde yazabiliriz. Bu OFDMA sisteminde kullanıcılara, sürekli alt taşıyıcı gruplarının atandığı varsayılmıştır. Buna göre, bu eşitlikte  $M$ , kullanıcıya atanan alt-taşıyıcı

sayısını,  $M_0$  ise, hangi alt-taşıyıcı setinin atandığını gösterir. Bu OFDMA sinyalinin otokorelasyon fonksiyonu ise aşağıdaki gibidir.

$$E[x_n x_{n+m}^*] = \left[ \sum_{k=M_0}^{M+M_0-1} X_k e^{j\frac{2\pi k}{N}n} \cdot \sum_{l=M_0}^{M+M_0-1} X_l^* e^{-j\frac{2\pi l}{N}(n+m)} \right] \quad (4.2)$$

$$\begin{aligned} &= \varepsilon_x \sum_{k=M_0}^{M+M_0-1} e^{-j\frac{2\pi mk}{N}} \\ &= \varepsilon_x e^{-j\frac{\pi(2M_0+M-1)m}{N}} \frac{\sin\left(\frac{\pi Mm}{N}\right)}{\sin\left(\frac{\pi m}{N}\right)} \end{aligned} \quad (4.3)$$



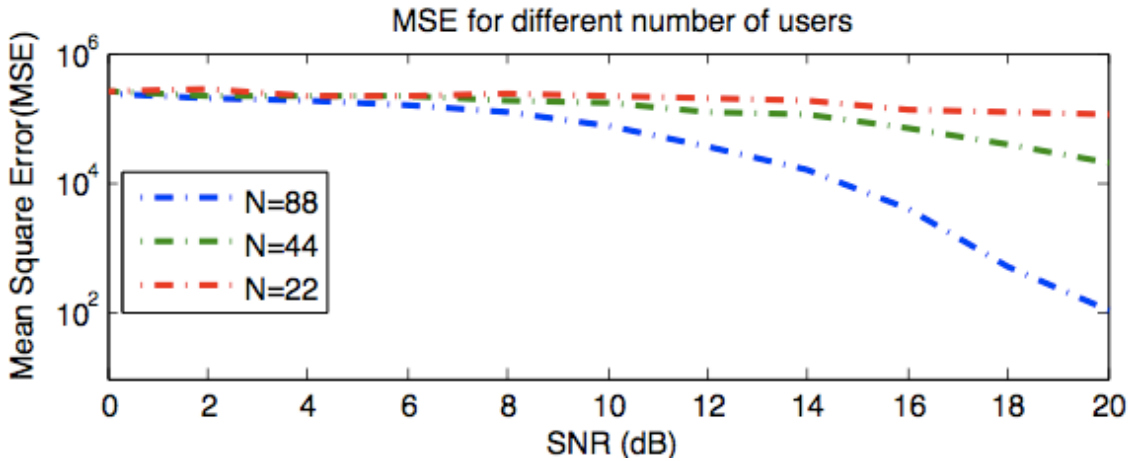
Şekil 4.3: Taşıyıcı sayısının, gönderilen sinyalin otokorelasyon fonksiyonuna olan etkisi

$\varepsilon_x = E\{|X_k|^2\}$  olmak üzere, 4.3'den görüldüğü üzere,  $x_n$  OFDMA sinyalinin otokorelasyonu  $M$  alt-taşıyıcı sayısına bağlıdır ve  $M$  azaldıkça, sinyalin otokorelasyonu artmaktadır.

Şekil 4.3'de, alt taşıyıcı sayısı 224 ve 32 olan iki ayrı kullanıcıya ait OFDM sinyalleri için otokorelasyon fonksiyonları çizdirilmiştir. Burada matematiksel analizi yapılan otokorelasyonun, azalan  $M$  ile arttığı daha net biçimde görülmektedir.

Dolayısıyla, bir OFDM sembolünün CP kısmı haricindeki parçaların ilintisiz olduğu varsayımı yapılarak elde edilen ML ve diğer metotlar, modifikasyon yapılmamış halleri ile çok kullanıcı OFDMA sistemlerinde iyi sonuç vermemektedirler.

Bu etkiyi göstermek için, alt-taşıyıcısı sayısı 22, 44, ve 88 olan bir kullanıcı için ML metrik kullanılarak, zaman kayması kestirilmiş ve bu senaryo için MSE-SNR eğrisi monte karlı simülasyonun sonucunda elde edilmiştir.



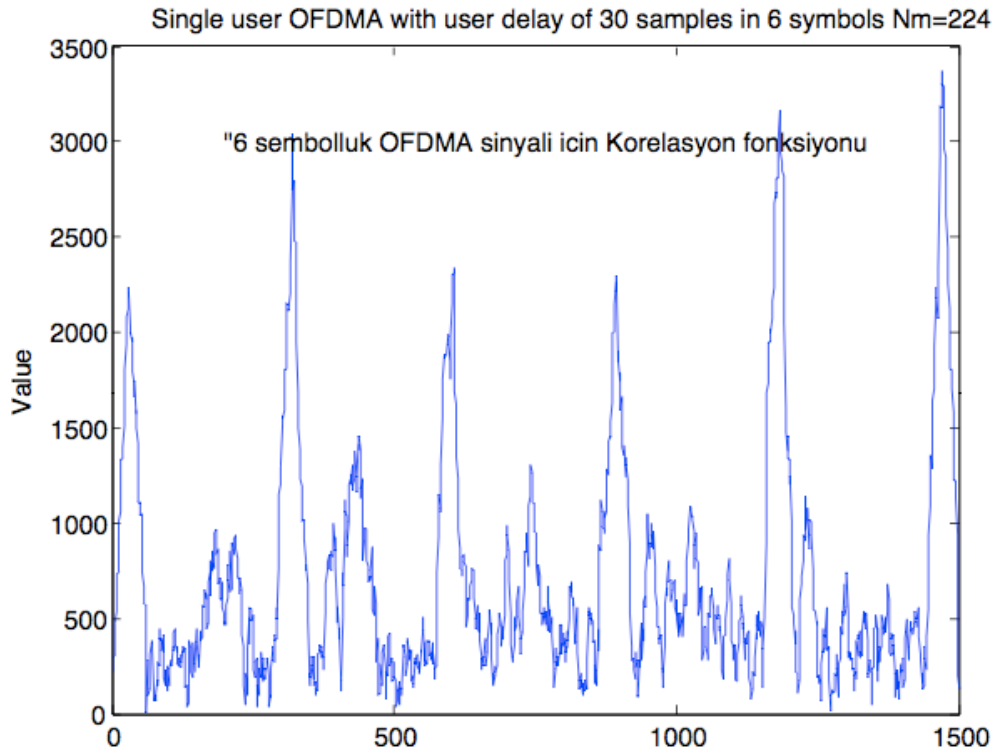
Şekil 4.4: Alt-taşıyıcı sayısının ML metodu üzerine etkisi

Şekil 4.1'de sistemin tüm alt-kullanıcıları, 256, kullandığında hata, SNR 20 iken  $10^{-2}$  mertebesinde iken, Şekil 4.4'e bakıldığında 88 alt-taşıyıcıya sahip bir kullanıcının hata oranı bu SNR değerinde  $10^2$  mertebesine yükselmiştir. Bu çok önemli bir performans kaybı olup, OFDMA sistemlerinde neden bu metotların direk olarak kullanılmadığını açıkça göstermektedir. Bu çalışmada, CP uzunluğunun ve kullanıcıya ait alt-taşıyıcı sayısının etkisi nispeten ortalama alma yöntemi ile azaltılmış, bu durumlardaki performansı arttırılmıştır.

#### 4.1.4 Senkronizasyon Tekniklerinin Ortalama Alma Yöntemi ile Performansının Arttırılması

Tek kullanıcı OFDM sistemlerinde kullanılan gözü kapalı senkronizasyon tekniklerinin performanslarının, ortalama alınarak iyileştirilmesi bu bölümde anlatılmıştır.

Bahsi geçen tüm gözü kapalı zamanlama senkronizasyon yöntemlerinde, kullanılan metriklerde, alıcıya ulaşan  $y(n)$  sinyali kullanılmaktadır ve bilindiği üzere bu sinyal tek yönlü kanaldan geçerek alıcıya ulaşmakta ve varsayımımız üzere sadece AWGN gürültüden etkilenmektedir. Dolayısıyla hesaplanan metriklerde, gürültünün de etkisi vardır ve bu da metotlar anlatılırken çizilen metrik eğrilerinden rahatça görülmektedir. Hiçbir zaman 0 değerine inmeyen bu fonksiyonda, özellikle düşük SNR değerlerinde, gerçek zaman kaymasında verdiği uç noktaya yakın büyüklükte yeni uç noktaları oluşmakta bu da, zaman kayması kestiriminin performansını düşürmektedir. Bu yapıda gürültünün etkisini azaltmanın yolları düşünüldüğünde, en iyi yöntemin elde edilen metriklerin, birkaç sembol üzerinden ortalaması alınarak elde edilmesi olmuştur.

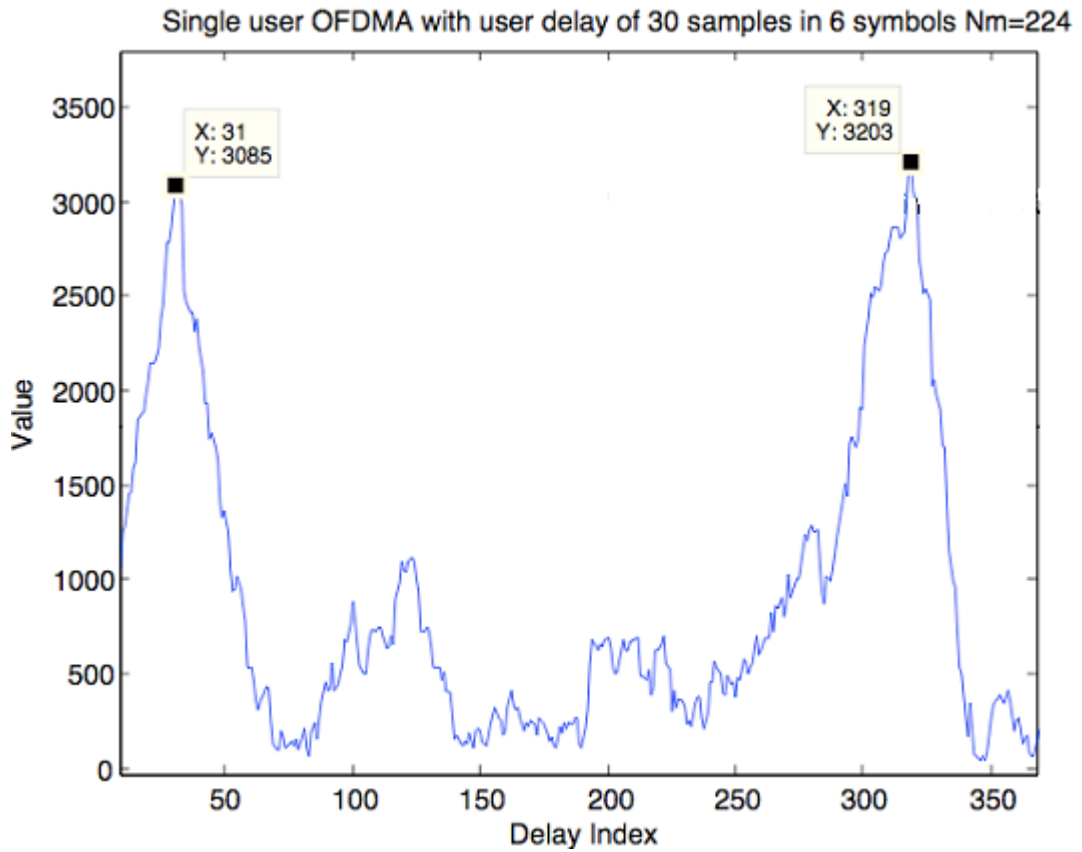


Şekil 4.5: Zaman kayması 30 olan kullanıcı sinyaline ait korelasyon metriği

Temel mantığı tüm metrikler için aynı olan, ortalama alma diye adlandırdığımız bu yöntemin performansı nasıl arttırdığını gösterirken, en basit metot olan korelasyon metriği kullanıldı.

Şekil 4.5 için, toplam alt-taşıyıcı sayısı 256, CP uzunluğu 32, olan, ve sistemdeki tek bir kullanıcıya 224 adet alt-taşıyıcı atanmış bir sistem ele alınmıştır. OFDM sembolünün gecikmesi 30 örnek olarak belirlenmiştir. Korelasyon metodu kullanılarak zaman kayması kestirilmek istenen bu OFDM sisteminde, bu koşullar altında çizdirilen korelasyon metriği bu şekilde görülmektedir.

Aşağıdaki şekilde ise (Şekil 4.6) ise, yukarıda 6 OFDM sembolü kullanılarak elde edilen metriğin belli bir bölgesine odaklanarak,  $N=256$ ,  $N_{CP}=32$  olan sistemde, metriğin  $N + N_{CP}$  ile periyodik olduğuna vurgu yapılmıştır.

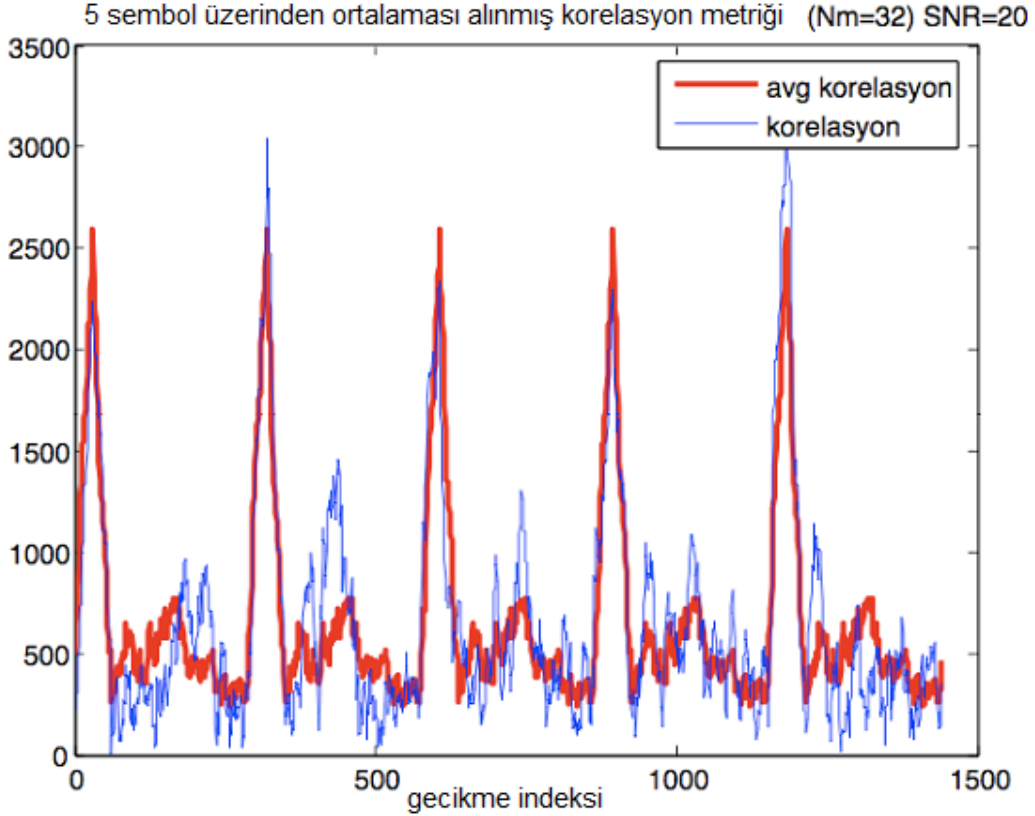


Şekil 4.6 : Korelasyon metriğinin periyodikliğı

Zaman kayması hesaplanırken, kullanılan metriğin sadece  $N + N_{CP}$  kadarlık bölümüne bakmak yeterlidir. Bu aralık içinde metriğe maksimum değeri veren nokta, kestirilmek

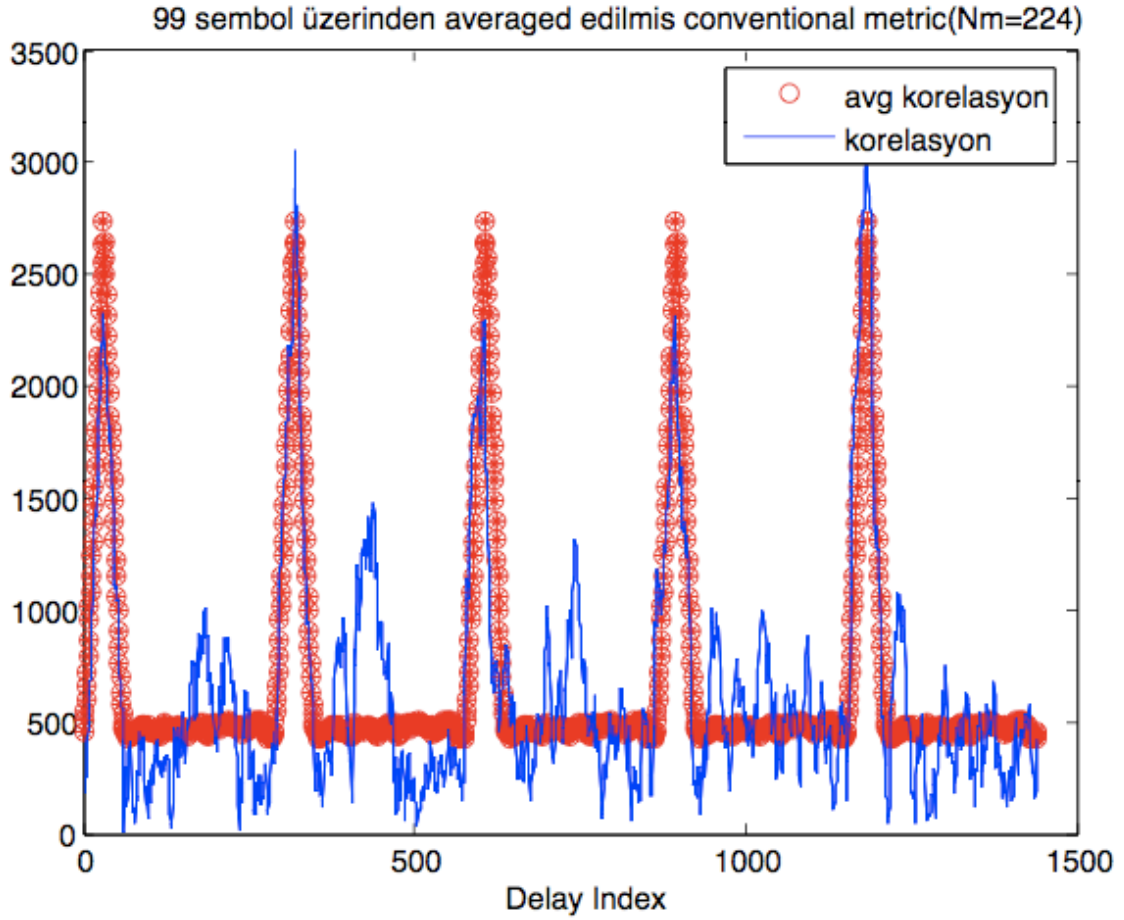
istenen zaman kaymasıdır. Kestirim yaparken yapılan hatanın azaltılması ve sistem performansının artırılması için, metrik üzerindeki gürültünün olabildiğince, azaltılabilmesi gerekmektedir ki bu da ortalama alma ile mümkündür.

Ortalama alma yöntemi ile gürültünün etkisi azaltılacak olan ve 6 OFDM sembolü kullanılarak elde edilen korelasyon metriği ilk önce  $N + N_{CP}$  lik parçalara ayrılır. 6 OFDM sembolü kullanılarak elde edilen metrikte, 5 tane bu şekilde parça bulunmaktadır. Bu şekil 4.5’de açıkça görülmektedir. Eşit uzunluktaki bu parçalar önce üst üste gelerek toplanır, daha sonra 5’e bölünür. Yani korelasyon metriğinin, 5 sembol üzerinden ortalaması alınmış olur. Bu basit işlem, kullanılan metodun performansını önemli ölçüde arttırmaktadır. Tahmin edileceği gibi, ortalaması alınacağı sembol sayısı arttıkça, sistemin performansı iyileşmekte ve hata 0’a yaklaşmaktadır. 5 sembol üzerinden ortalaması alınarak elde edilen korelasyon metriği şekil 4.7’de gösterilmektedir. Uç noktaları arasındaki gürültünün nasıl azaldığını çok net bir şekilde görülmektedir. Şekilde mavi eğri korelasyon metriğini, kırmızı ile gösterilen eğri ise 5 sembol üzerinden ortalaması alınmış korelasyon metriğini göstermektedir.



Şekil 4.7: 5 sembol üzerinden ortalama almanın korelasyon metriği üzerine etkisi

Şekil 4.8 ise, ortalamasının alındığı sembol sayısı 99'a çıkarılmıştır. Bunun sonucunda elde edilen korelasyon metriğinden gürültünün etkisinin neredeyse kaybolduğunu görebiliriz. Fakat bunun karşılığında sistem karmaşıklığı da son derece artacaktır.

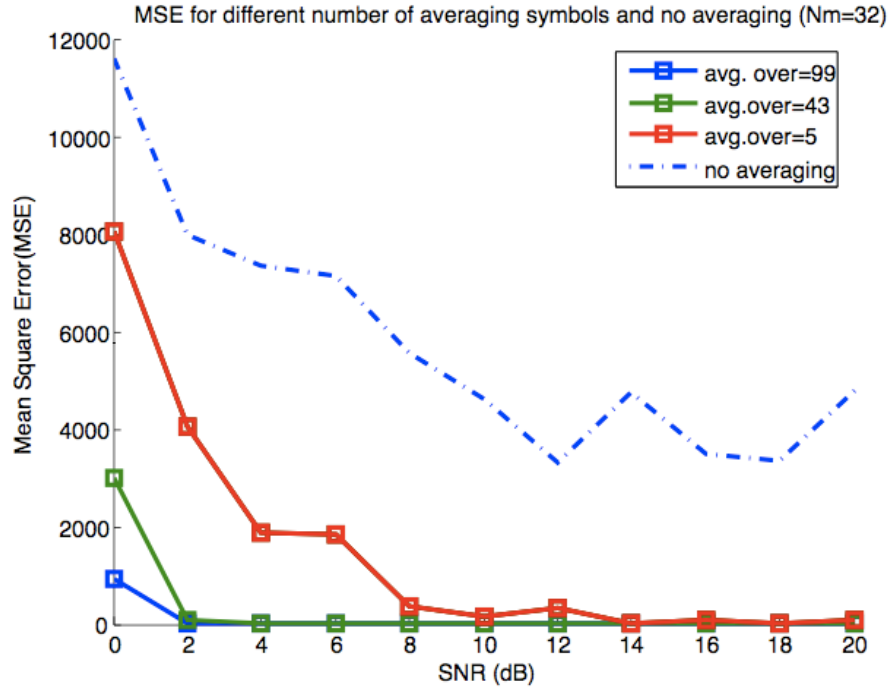


Şekil 4.8: 99 sembol üzerinden ortalama almanın korelasyon metriği üzerine etkisi

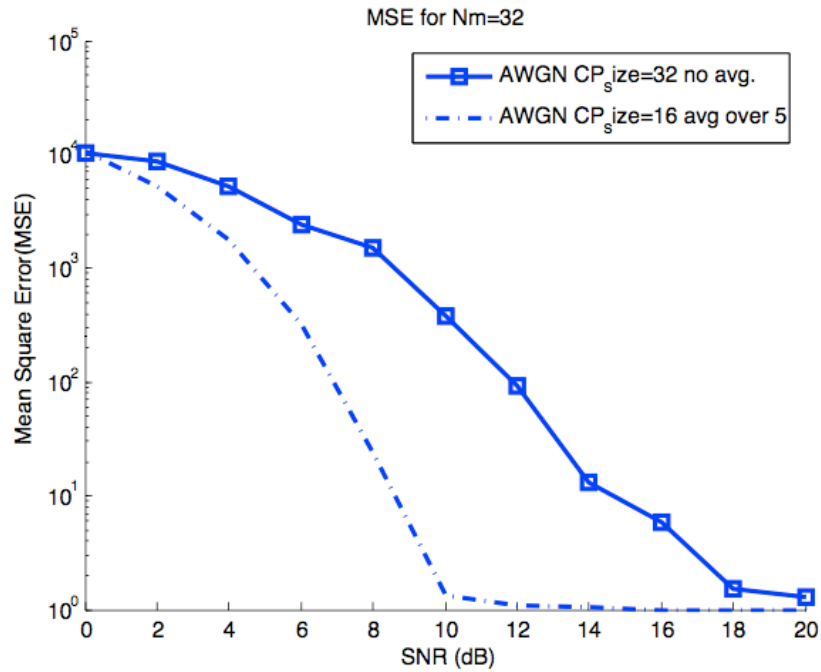
Farklı sembol sayıları üzerinden ortalama almanın etkisini, her durum için ayrı ayrı hesaplanan MSE değerlerinin üst üste çizdirildiği Şekil 4.9'da daha net bir şekilde görebiliriz. Burada kullanıcıya atanan alt-taşıyıcı sayısı 32 olarak belirlenmiştir.

Ortalama almanın diğer bir avantajı da, sisteme bir çok yarar sağlamasına karşın, spektral verimliliği düşüren CP uzunluğuna olan etkisidir. Şekil 4.1'de CP uzunluğu arttıkça, kullanılan metotlarının zaman kayması kestirme performanslarının arttığı gözlenmiştir. Ortalama olarak, daha düşük CP boyutları ile ortalama alınmayan ve daha uzun CP boyutlarına sahip sistemler ile aynı veya daha iyi performanslar elde

edilmektedir. Bu durum şekil 4.10'da gösterilmektedir. Bu da ek bir karmaşıklık getirmesine rağmen, CP boyutlarının azaltılmasına ve spektral verimliliğin artmasına olanak verebilecektir.



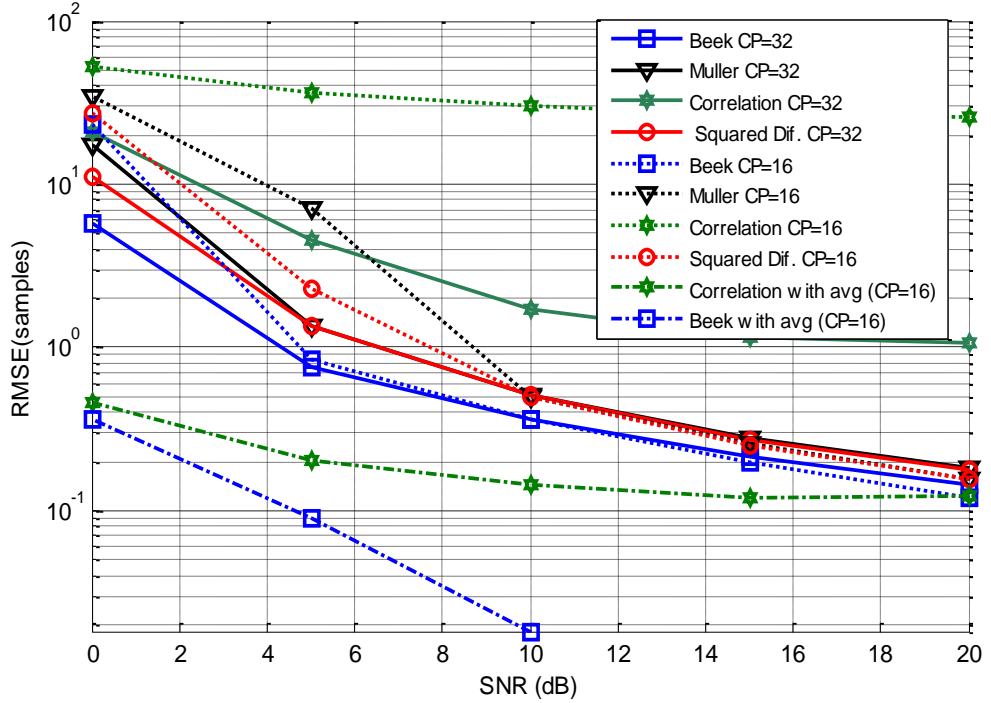
Şekil 4.9: Farklı sembol sayıları üzerinden ortalama almanın etkisi



Şekil 4.10: Ortalama almanın CP uzunluğu üzerine etkisi

Toplam alt-taşıyıcı sayısı  $N = 256$ , CP uzunluğu  $N_{CP} = 32$  olan bir OFDM sisteminde, tek kullanıcı senaryoda, kullanıcıya ait alt-taşıyıcı sayısı 32 olarak verilmiştir. Korelasyon metodu kullanılarak hesaplanan zaman kayması kestirimine ait MSE eğrisi, ortalama yapılmayan ve  $N_{CP} = 32$  olan senaryo ile 5 sembol üzerinden ortalama alınan buna karşılık  $N_{CP} = 16$  olan iki sistemi karşılaştırılması Şekil 4.10'da yapılmaktadır. Şekilden açıkça görüleceği gibi, sadece 5 sembol üzerinden ortalaması alınan fakat CP uzunluğu yarıya indirilen sistemin, MSE'si daha düşüktür yani sistem performansı daha iyidir. Bu durum, sistem için gerekli olan CP uzunluğunun, ortalama alma metodu düşürülerek, sistem spektral verimliliğinin artırılabilirliğini göstermektedir.

Son olarak, Şekil 4.1'de tek kullanıcı OFDM sistemlerinde kullanılan gözü kapalı metotların performanslarının karşılaştırıldığı simülasyona, ML ve korelasyon metotları için 5 sembol üzerinden ortalama alma durumu eklenmiş ve sistem performansını ne kadar etkilediği ve hataların sıfıra yakın değerler aldığı Şekil 4.11'de açıkça gösterilmiştir.



Şekil 4.11: Ortalama almanın sistem performansına etkisi

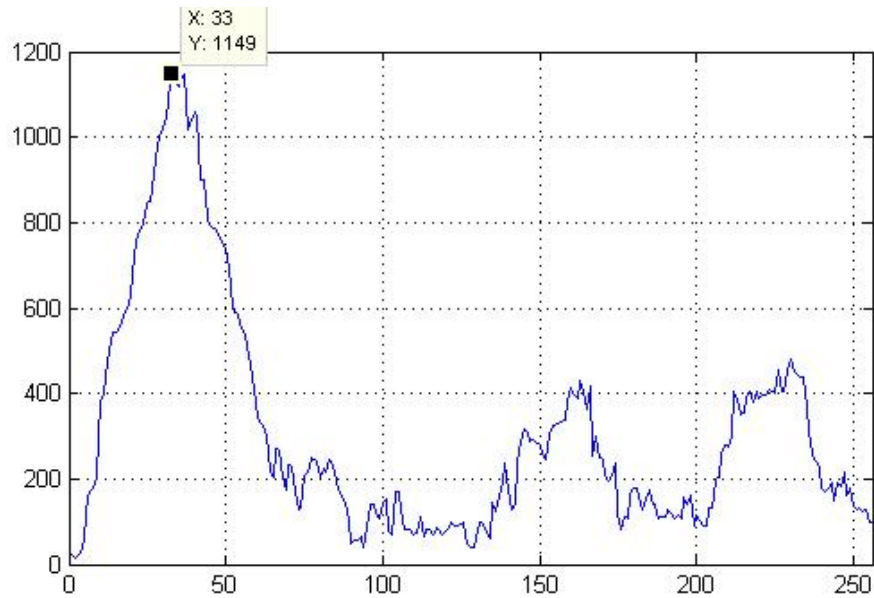
## 4.2 MACRO HÜCRE İLE FEMTO HÜCRE ARASINDAKİ ZAMANLAMA SENKRONİZASYONU

Daha önce de açıklandığı gibi, tezde ele alınan problem, femto hücrenin, macro hücre mobil kullanıcılarından gelen UL sinyalleri dolayısıyla oluşan ICI'yi minimize etmek için, gelen toplam OFDMA sinyali içinde, birinci kullanıcıya senkronize olmaktır. Yani problem bir çok kullanıcı senkronizasyon problemidir. Femto hücre ile makro hücre arasında pilot sembol göndererek uygulanacak bir senkronizasyon metodu uygulanamayacağı için, bu işlem göz kapalı olarak gerçekleşmesi gerekmektedir. Farklı zaman kaymaları ile alıcıya ulaşan  $y(n)$  sinyali içinde, birinci kullanıcının gecikmesinin, sadece  $y(n)$  sinyali kullanılarak kestirilmesi gerekmektedir ki, bunun da tek kullanıcı OFDM sistemleri için kullanılan mevcut gözü kapalı senkronizasyon metriklerindeki, korelasyon penceresinin artırılması ile mümkün olduğu, 3. Bölümde ayrıntıları ile anlatılmıştır.

Matematiksel olarak ifade etmek gerekirse, tek kullanıcı OFDM sistemlerinde amaç,

$$y(n) = x(n - \theta) + n(n) \quad (4.1)$$

sistem modelindeki  $\theta$ 'nın kestirilmesidir ve mevcut gözü kapalı senkronizasyon metotları bunu düşük hata oranları ile yapmaktadırlar.



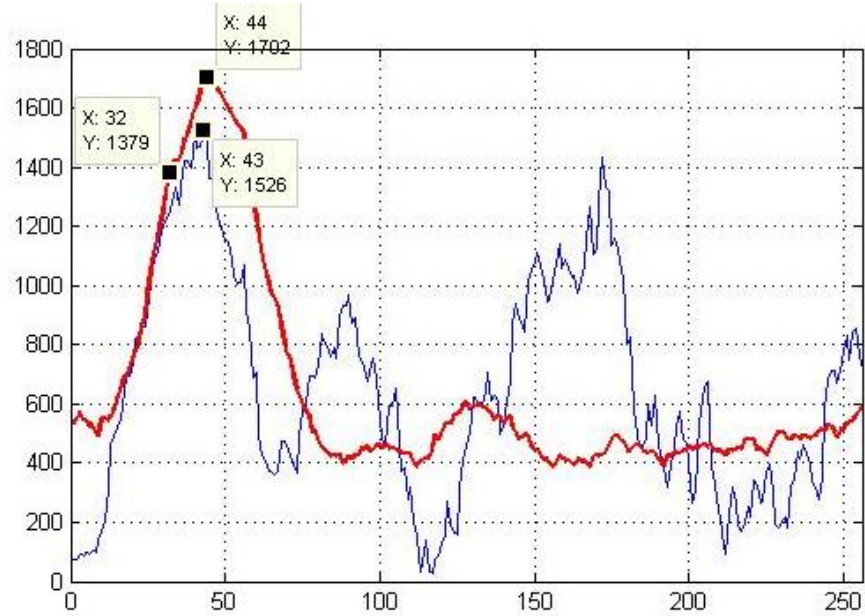
Şekil 4.12: Gecikmesi 32 örnek olan kullanıcıya ait korelasyon metriği

Örneğin sistem parametreleri  $N=256$  ve  $N_{CP}=32$  olan bir sistemde 32 örnek zaman kaymasına uğramış bir kullanıcının alıcıda zaman kaymasını kestirmek için elde ettiği korelasyon metriği Şekil 4.12'deki gibidir. Burada istenilen zaman kayması, metriğin maksimum değerini veren nokta olarak çok kolay bir şekilde elde edilir.

Fakat 3 kullanıcılu bir OFDMA sistemi ele aldığımızda ( $N_u=3$ ), her bir kullanıcının farklı gecikmelerle ( $d_1=32, d_2=42, d_3=55$ ) alıcıya ulaşan, 4.2'deki toplu sinyalden, bu çalışmada ele alınan, ilk gelen kullanıcının zaman kaymasının ( $d_1$ ) gözü kapalı olarak kestirimi mümkün değildir.

$$y(n) = \sum_{i=1}^{N_u} y_i(n-d_i) + w(n) \quad (4.2)$$

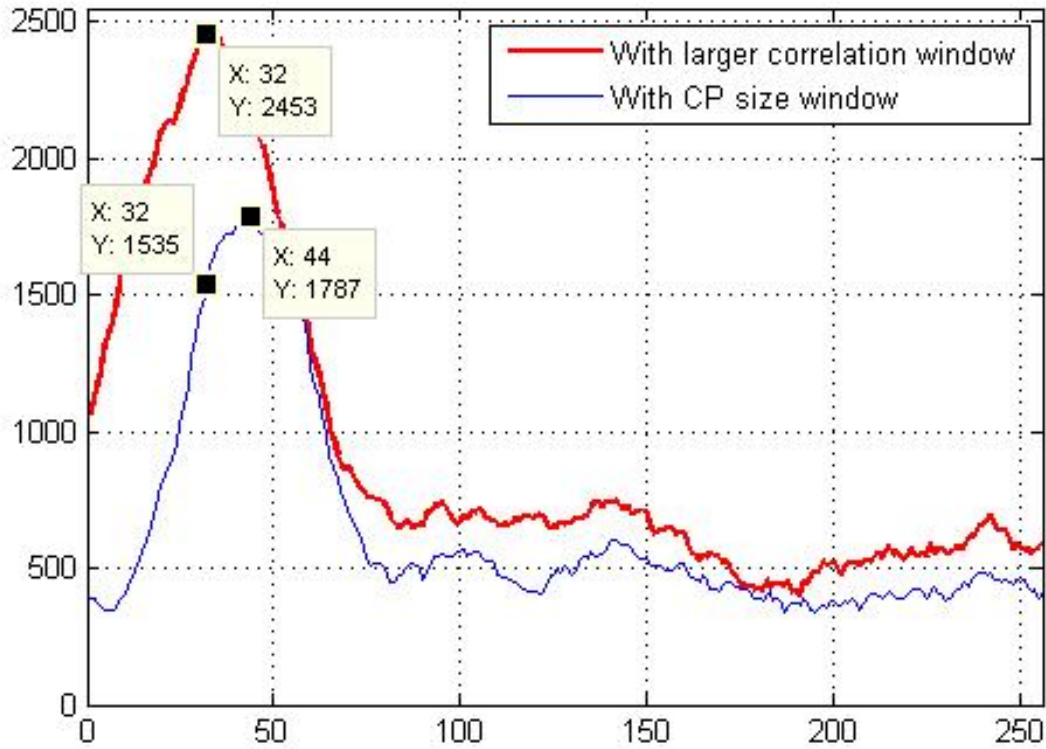
Tahmin edileceği gibi, tek kullanıcılu senaryoda tek bir uç noktası veren metrik, çok kullanıcılu senaryoda birden fazla uç noktası verecektir. Ve maalesef bu uç noktaları birbiri içine geçmiş durumdadır ve zaman kaymalarının ayrı ayrı kestirilmesine izin vermemektedir.



Şekil 4.13: Üç kullanıcılu senaryoda elde edilen korelasyon metriği

Şekil 4.13’de bu durum açıkça görülmektedir. Mavi eğri ile korelasyon metriği, kırmızı eğri ile ise ortalaması alınmış korelasyon metriğini gösteren bu şekilde, elde edilmek istenen zaman kaymaları eğriler üzerinde işaretlenmiştir. Fakat 3. Bölümde anlatıldığı gibi, her bir sinyal için, diğer kullanıcılardan gelen sinyaller bir girişim etkisi görmekte ve zaman kaymalarının kestirilmesini engellemektedir.

Bu çalışmada, bu toplu sinyal,  $y(n)$ , içinden birinci kullanıcıya ait gecikmenin,  $d_1$ , kestirilmesi, korelasyon penceresinin arttırması ile modifiye edilen tüm gözü kapalı metotlar ile düşük hatalar ile, yapılmıştır. Korelasyon penceresindeki artış miktarının, femto hücreye ilk ve son gelen markı hücre kullanıcıların zaman kayması farkı kadar olduğu 3. Bölümde analizler yapılarak gösterilmiştir. Bu çalışmada  $D_{\max} = d_3 - d_1$  ‘in bilindiği varsayımı yapılmakta ve daha sonraki çalışmalarda bu değerin kestirilmesi amaçlanmaktadır.



Şekil 4.14: Üç kullanıcıli senaryoda, modifiye edilen korelasyon metriği

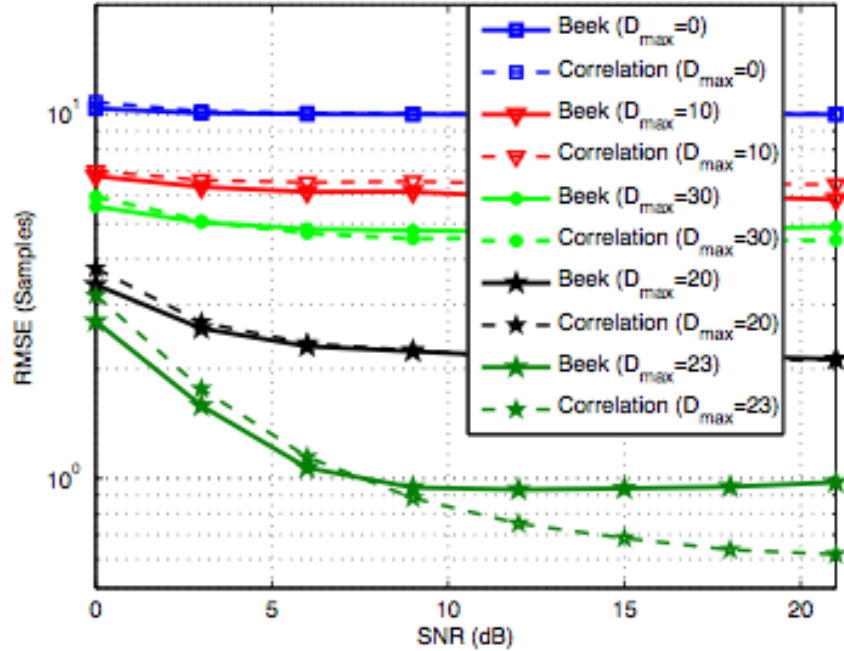
Ele alınan  $d_1 = 32$ ,  $d_2 = 42$ ,  $d_3 = 55$  gecikmelere sahip 3 kullanıcıli sistem için, korelasyon penceresinin  $D_{\max} = d_3 - d_1 = 23$  örnek genişletirlererek elde edilen yeni

korelasyon metriği şekil 4.14’de gösterilmektedir. Kırmızı eğride açıkça görüldüğü gibi, metriğin maksimum noktası, birinci kullanıcıya ait zaman kaymasını vermektedir.

Bu bölümde önerilen metotun performansı, tek yönlü AWGN kanal için bilgisayar simülasyonları ile incelenmiştir.

Gecikmeleri  $d_1 = 32$ ,  $d_2 = 42$  ve  $d_3 = 55$ ; kendilerine atanan alt taşıyıcı vektörleri  $\Gamma_1 = [-100, \dots, -37]$ ,  $\Gamma_2 = [-20, \dots, 43]$  ve  $\Gamma_3 = [50, \dots, 113]$  olarak atanan 3 kullanıcılu bir senaryo göz önüne alalım.  $N = 256$  ve  $N_{CP} = \{16, 32\}$  olsun.

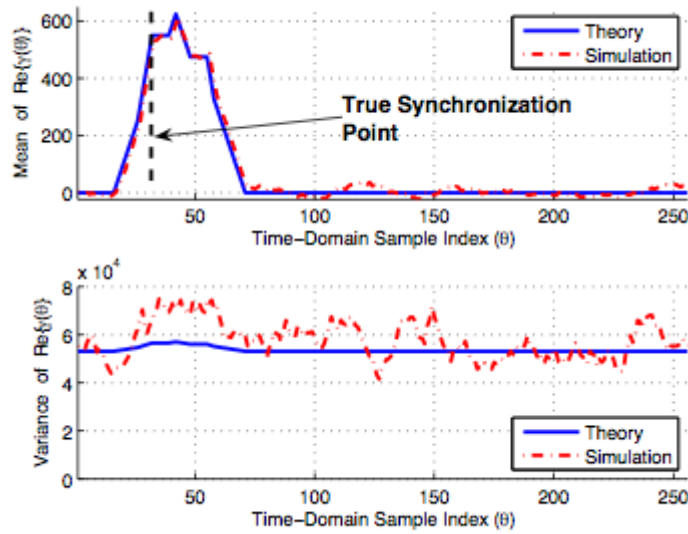
Şekil 4.15’de ML (2.29) ve korelasyon tabanlı (2.30) yaklaşımların çok kullanıcılu senaryoda, farklı  $D_{max}$  değerleri için RMSE karşılaştırılması yapılmıştır. Elde edilen simülasyon sonuçlarında,  $D_{max} = d_3 - d_1$  yapıldığında kestirimcilerin tüm SNR değerlerinde en iyi performansı verdiği görülmüştür. Ayrıca yüksek SNR değerlerinde korelasyon tabanlı yaklaşımın ML’e göre daha iyi sonuç verdiği izlenmiştir. Diğer bir deyişle, tek kullanıcılu senaryoda optimum sonuçları veren ML yaklaşımı, çok kullanıcılu senaryomuzda daha basit olan korelasyon tabanlı metot karşısında optimum sonuçları verememiştir.



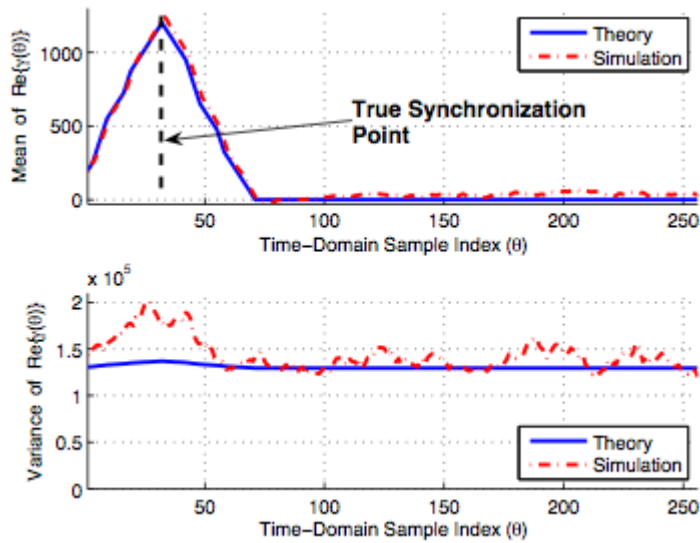
Şekil 4.15: Çok kullanıcılu senaryoda önerilen metotun farklı pencere aralıkları için RMSE performansları

Farklı  $D_{\max}$  değerleri için hesaplanan  $\text{Re}(\gamma(\theta))$  'nın istatistiklerinin karşılaştırılması ise SNR=20 dB için Şekil 4.16 ve Şekil 4.17'de verilmektedir.

Şekil 4.16'de  $\text{Re}(\gamma(\theta))$  'nın ortalaması ve varyansı ((3.17) ve (3.18) eşitlikleri)  $D_{\max}=0$  için, yani korelasyon penceresinin tek kullanıcılı durumda olduğu gibi CP uzunluğunda olduğunda, çizdirilmiştir. Korelasyon fonksiyonunun ortalaması, uç noktasının, birinci kullanıcı için gerçek senkronizasyon noktasından sonra olduğunu göstermektedir.



Şekil 4.16:  $D_{\max}=0$  için korelasyon metriğinin ortalaması ve varyansı



Şekil 4.17:  $D_{\max}=23$  için korelasyon metriğinin ortalaması ve varyansı

Şekil 4.17’de ise,  $\text{Re}(\gamma(\theta))$  ’nın ortalaması ve varyansı  $D_{\max} = d_3 - d_1 = 23$  için çizdirilmiştir. ((3.30) ve (3.31) eşitliklerine bakınız)  $D_{\max} = 0$  olduğu ( $N_{\text{corr}} = N_{\text{CP}}$ ) olduğu durumun aksine, Şekil 4.14’de olduğu gibi daha geniş korelasyon penceresinin kullanıldığı durumda, korelasyon fonksiyonunun birinci kullanıcının gerçek zaman gecikmesinde tek bir uç noktası vermektedir.

Bu da tezde amaçlanan , femto hücreye gelen makro hücre mobil kullanıcıları sinyallerinden, ilk gelen sinyale senkronize olma durumunu gerçekleştirmiştir.

## 5. TARTIŞMA VE SONUÇ

Bu tezde, UL-OFDMA sistemlerinde, çoklu kullanıcının olduğu bir senaryoda birinci kullanıcının gecikmesinin gözü kapalı bir şekilde kestirilmesi için, mevcut gözü kapalı senkronizasyon metotlarının geliştirilmesi ile elde edilen bir metot sunulmuştur. Birinci kullanıcıya yanlışsız bir şekilde senkronizasyon, pratik senaryolarda ICI'yi minimize ettiği için kritik önem taşımaktadır.

Mevcut gözü kapalı metotların performans analizlerinin karşılaştırıldığı ayrıca ortalama alma yöntemi ile daha iyi sonuçlar alınan bu metotların geliştirilmesi ile oluşturulan yeni metotta, son kullanıcı ile ilk kullanıcı arasındaki gecikme farkı olan  $D_{max}$ 'ın bilindiği kabul edilmekte ve tek yönlü AWGN kanal için yapılan bilgisayar simülasyonlarında, birinci kullanıcıya çok düşük hatalarla senkronize olduğu gösterilmiştir.

Önerilen metot, birincil sistemin uygun spektrumlarını kullanmaya çalışan ikincil sistemin olduğu ve bu nedenle birinci kullanıcıya kesin bir şekilde senkronize olmanın gerektiği, tüm OFDMA tabanlı kablosuz sistemlerde kullanılabilir. Önerilen metotun kullanılabilirliği, tezde bilindiği kabul edilen  $D_{max}$ 'ın sistemden kestirilmesi ile artırılabilir.

## KAYNAKLAR

1. 3GPP, 2006, Physical Layer Aspects for Evolved Universal Terrestrial Radio Access (UTRA). *Release 7, Technical Specifications 25.814*.
2. BINGHAM, J.A.A, 1990, Multicarrier Modulation for Data Transmission: An Idea whose Time Has Come. *IEEE Communication Magazine* . Vol.28, No.5.
3. MATIAE, D., 1998, OFDM as a Possible Modulation Technique For Multimedia Applications in the Range of mm Waves , John Wiley&Sons Inc., New York, 123-4567-890.
4. BEEK, J., SANDELL M., 1997, ML Estimation of Time and Frequency Offset in OFDM Systems, *IEEE Trans. Signal Processing*. ASCE. Vol.45, No.7.
5. MOOSE, M., 1994, A Technique For Ortogonal Frequecy Division Multiplexing Frequency Offset Correction, *IEEE Trans. Commun.*,Vol.42.
6. MORELLI, M., 2004, Timing And Frequency Synchronization for uplink of an OFDMA System, *IEEE Trans. Commun.*,Vol.42, No.2.
7. DALHMAN, E,EKSTROM H. 2006, The 3G Long Term Evaluation- Radio Interface Concepts and Performance Evaluation. *Vehicular Technology conference*. May 2006, pp. 137-141
8. 3GPP, 2004, Technical Specification Group Radio Access Netwok, *Release 7, Technical Specifications 25.892*.
9. AGILENT, 2007, 3GPP LTE System Overview, Product Development and Test Challenges, *Technical Overview*.
10. YUCEL, Tefvik, 2004, Channel Spectrum and Waveform Awareness in OFDM-Based Cognitive Radio Systems, Thesis (PhD), University of South Florida
11. MULLER, S., 1998, On the Optimality of Metrics for Coarse Frame Synchronization in OFDM: A Comparison , *IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Comm. (PIMRC'98)*, Boston, USA, September 1998
12. WEI, L., SCHLEGEL, C., 1995 , Synchronization Requirements for Multiuser OFDM and Satellite Mobile and Two-Path Rayleigh Fading Channels, *IEEE Trans. Commun.*,Vol.43, No.2/3/4.

13. BEEK, J., 1998, Synchronization and Channel Estimation in OFDM Systems, Thesis (PhD), Lulea University of Technology
14. LASHKARIAN, L., 2000, Class of cyclic-based estimators for frequency-offset estimation of OFDM systems, , *IEEE Trans. Commun.*, Vol.48, No.12.
15. LV, Tiejun, CHEN, Jie, 2003, ML Estimation of Timing Offset Using Multiple OFDM Symbols in OFDM Systems, *GLOBECOM, December 2003, San Francisco, USA*.
16. MULLER, S., 1998, On the Optimality of Metrics for Coarse Frame Synchronization in OFDM: A Comparison , *IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Comm. (PIMRC'98)*, Boston, USA, September 1998
17. SPETH, Micheal, 1997, Frame Synchronization of OFDM Systems in Frequency Selective Fading Channels, *In Proceedings of the Vehicular Technology Conference ,1997*.
18. KANG, Sang, 2008, Soft QoS-based GAG Scheme for WCDMA Femtocell Networks, *ICACT , 17-20 February 2008*.
19. BEEK, J.,1999, A time and Frequency Synchronization Scheme For Multiuser OFDM, *IEEE J. Select Areas Commun (JSAC)*, vol. 17, no.11, 1900-1914.

## ÖZGEÇMİŞ

Sibel Tombaz 06.12.1984 yılında Giresun’da doğdu. İlköğretimi Tamzara İlköğretim Okulunda, ortaöğretimi ise Hüseyin Hüsnü Tekışık Anadolu Lisesinde tamamladı. 2002 yılında Sivas Fen Lisesi’nden mezun olduktan sonra, aynı yıl İstanbul Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği bölümünde lisans öğrenimine başladı. 2006 yılında bölüm ve fakülte birincisi olarak mezun olduktan sonra İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik-Elektronik Mühendisliği yüksek lisans programına kabul edildi. Aynı yıl İstanbul Kültür Üniversitesi Elektronik Mühendisliği bölümünde Araştırma Görevlisi olarak çalışmaya başladı. 2008 yılında yüksek lisans tez çalışmaları için University of South Florida’da Wireless Communication and Signal Processing grubunda 7 ay bulundu. Halen Tübitak’a ait bir projede araştırmacı olarak bulunmaktadır.