

T.C.
GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

KAPALI ALAN KONUM TESPİTİNDE RSSİ TABANLI
DÜŞÜK ENERJİLİ BLUETOOTH KULLANIMI

NIYAZİ NADİ SÜMER
YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

GEBZE
2020

T.C.
GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

KAPALI ALAN KONUM TESPİTİNDE
RSSI TABANLI DÜŞÜK ENERJİLİ
BLUETOOTH KULLANIMI

NİYAZİ NADİ SÜMER
YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DANIŞMANI
PROF. DR. OĞUZ KUCUR

GEBZE
2020

T.R.
GEBZE TECHNICAL UNIVERSITY
GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

**USING RSSI-BASED BLUETOOTH LOW
ENERGY FOR INDOOR LOCATION
DETECTION**

NIYAZI NADI SÜMER
**A THESIS SUBMITTED FOR THE DEGREE OF
MASTER OF SCIENCE**
DEPARTMENT OF ELECTRONICS ENGINEERING

THESIS SUPERVISOR
PROF. DR. OĞUZ KUCUR

GEBZE
2020



YÜKSEK LİSANS JÜRİ ONAY FORMU

GTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 17/07/2020 tarih ve 2020/34 sayılı kararıyla oluşturulan jüri tarafından 07/08/2020 tarihinde tez savunma sınavı yapılan Niyazi Nadi Sümer'in tez çalışması Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS tezi olarak kabul edilmiştir.

JÜRİ

ÜYE

(TEZ DANIŞMANI) : Prof. Dr. Oğuz Kucur

ÜYE

: Prof. Dr. Murat Doğruel

ÜYE

: Dr. Öğretim Üyesi Saliha Büyükçorak Edibali

ONAY

Gebze Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun
...../...../..... tarih ve/..... sayılı kararı.

İMZA/MÜHÜR

ÖZET

İnsanlar genellikle ofisler, hastaneler, fabrika çalışma alanları ve diğer iç mekânlar olmak üzere binaların içinde zaman geçirirler. Günümüzde bu tür ortamlarda konumlandırma ve navigasyonun önemi büyüktür. Genelde konum bilgisi almak için yaygın olarak kullanılan küresel konumlandırma sistemi (Global Positioning System (GPS)) kapalı alanlarda kullanılamaz. Bu sebeple, gerçek zamanlı konum sisteminin yeni teknolojisine ihtiyacımız vardır. Bu çalışmada Bluetooth Low Energy (BLE) RSSI kullanımı araştırılmıştır. Alınan işaret gücü göstergesi (Received Signal Strength Indicator (RSSI)) doğruluğunu sağlamak için Logaritmik uzaklık yol kaybı modelinin (Path Loss-Log-Distance model) sabit yol kaybı katsayısı ile incelenmesi, lognormal gölgeleme modeli (Log Normal Shadowing Model (LNSM)) ile ortamdaki yol kaybı katsayısı değerinin ve standart sapmasının değerlerini bilerek doğruluk oluşturulması, anten parametresinin verici anten üzerindeki etkisinden kaynaklı çıkış gücünün 3 frekans ile yayın yapmasının incelenmesi ile tek frekanstan yayının LNSM ile incelenmesi gerçekleştirilmiştir. Konumlandırmayı hesaplamak için farklı bir üçgenleme algoritması kullanılmıştır. Çalışmada tüm hesaplamalar ve algoritmalar gerçek ortamlarda denenmiş olup sonuçları kaydedilmiştir. Bu çalışmada, BLE teknolojisiyle kapalı alan konumlandırma için daha iyi algoritmalar geliştirilmiş ve konum hassasiyeti arttırılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Nesnelerin interneti, üçgenleme, konumlandırma, RSSI, Düşük Enerjili Bluetooth

SUMMARY

People often spend time in buildings such as offices, hospitals, factory workspaces, and so on. Today, positioning and navigation are of great importance in such environments. Global Positioning System (GPS), which is commonly used for obtaining location information, cannot be used indoors. Therefore, we need the new technology of the real-time location system. In this research, the use of Bluetooth Low Energy (BLE) aided Received Signal Strength Indicator (RSSI) was investigated. Examination of Path Loss –Log-Distance model with fixed path loss exponent to ensure RSSI accuracy, creating accuracy by knowing the values of the path loss exponent value and standard deviation in the environment with Log Normal Shadowing Model (LNSM), examining the output power of the antenna parameter on the transmitter antenna with three frequencies. Frequency analysis of the broadcast with LNSM were realized. A different trilateration algorithm was used to calculate the positioning. In the study, all calculations and algorithms have been tried in real environments and the results have been recorded. With this work, better algorithms for indoor positioning with BLE technology have been developed and the position accuracy has been improved.

Key Words: Internet of Things (IoT), trilateration, localization, RSSI, Bluetooth Low Energy

TEŞEKKÜR

Başta, yüksek lisans eğitimimde ve akademik hayatımda desteğini ve yardımlarını hiçbir zaman esirgemeyip bilgisi ile bu çalışmanın oluşmasının yolunu açan danışmanım Prof. Dr. Oğuz Kucur'a, çalışmanın çeşitli safhalarında yorumlarıyla katkıda bulunan Dr. Öğr. Üyesi Saliha Büyükçorak'a,

Bütün çalışmam için gerekli ekipman, donanım ve test ortamını bana sunan TrioMobil kurucu üyesi ve Genel Müdürü Nevzat Ataklı'ya, çalışma arkadaşlarım Engin Kuş ve Fatih Yazıcı'ya ve göstermiş olduğu desteklerinden dolayı sevgili eşim Hilal Nur SÜMER'e en içten teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	v
SUMMARY	vi
TEŞEKKÜR	vii
İÇİNDEKİLER	viii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	x
ŞEKİLLER DİZİNİ	xi
TABLolar DİZİNİ	xii
1. GİRİŞ	1
1.1. Tezin Amacı, Katkısı ve İçeriği	2
2. DÜŞÜK ENERJİLİ BLUETOOTH HABERLEŞMESİ	3
2.1. BLE Teknolojisinin Spesifikasyonları	3
2.1.1. Frekans Bandı, Kanalları ve İletim Gücü	4
2.1.2. Modülasyon Tipi	5
2.1.3. BLE Cihazlarının Haberleşme Roller	5
2.2. Alınan İşaret Gücü Göstergesi (Received Signal Strength Indicator (RSSI))	6
2.2.1. RSSI –Mesafe İlişkisi	7
2.3. RSSI'a Çoklu Yol Gölgeleme Etkisi	7
2.4. İşaret Yayılımı, Yol Kaybı ve Sönümlenmesi	8
2.4.1. Boş Uzayda İşaret Yayılım Modeli	10
2.5. Pratik Yol Kaybı Modelleri	13
2.5.1. Log-Distance Yol Kaybı Modeli	13
2.5.1.1. Yol Kaybı Katsayısının (n) MMSE ile Belirlenmesi	15
2.5.2. Normal Gölgeleme ile Yol Kaybı Modeli (Log-Normal Shadowing Model (LNSM))	16
2.5.2.2 Normal Dağılımın Standart Sapmasının (X_σ) Belirlenmesi	19
2.6. BLE Cihazının 3 Farklı Frekanstan Yayını	21
2.6.1. Yayın Yapılan Frekansın Kullanılan Anten ile ilişkisi	22

3. KONUMLANDIRMA	24
3.1. Klasik Üçgenleme Tekniği ile Konum Tespiti	24
3.2. Filtreli Üçgenleme ve Ağırlıklandırma Metodu	26
3.2.1. Filtrenin Belirlenmesi	27
3.2.2. Ağırlıklandırmanın Sağlanması	29
3.2.3. Üçgenleme ile Konum Tespiti	30
4. SAYISAL ÖRNEK ve SONUÇLAR	32
4.1. Yol Kaybı Katsayısı Belirlenmeden Yapılan Konumlandırma	32
4.2. Yol Kaybı Katsayısı ve Normal Dağılımın Standart Sapmasının Kullanılması (LNSM) ile Yapılan Konumlandırma	35
4.3. Tek Frekanstan Yapılan Yayın ve LNSM ile Konumlandırmanın Yapılması	40
4.4. Filtreli Üçgenleme ve Ağırlıklandırma Metodunun Bölüm 4.1, 4.2, 4.3'te Hesaplanan RSSI-mesafe Değerlerine Uygulanması ile Konumlandırmanın Yapılması	50
5. SONUÇLAR ve YORUMLAR	56
 KAYNAKLAR	 60
ÖZGEÇMİŞ	62
EKLER	63

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler ve Açıklamalar

Kisaltmalar

BLE	: Bluetooth Low Energy (Düşük Enerjili Bluetooth)
ms	: Mili Saniye
sn	: Saniye
MspS	: Mega Symbol per Second (Saniye başına mega sembol)
Mbps	: Mega Bit per Second (Saniye başına mega bit)
RSSI	: Received Signal Strength Indicator (Alınan İşaret Gücü Göstergesi)
MHz	: Mega Hertz
CH	: Channel (Kanal)
LOS	: Line-of-Sight (Açık Görüş Hattı)
NLOS	: Non-Line-of-Sight (Kapalı Görüş Hattı)
GTÜ	: Gebze Teknik Üniversitesi

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil No:</u>	<u>Sayfa</u>
2.1: BLE frekans kanalları.	4
2.2: Alınan işarete çoklu yol yayılımı etkisi.	8
2.3: Alınan işaretin maruz kaldığı etkiler.	9
2.4: Çok yollu sönümleme ve yol kaybı.	10
2.5: Log- Normal Gölgeleme modeli 1.	17
2.6: Log- Normal Gölgeleme modeli 2.	18
2.7: BLE advertise ve scan frekansları.	21
2.8: Advertise anı akım tüketim grafiği.	22
2.9: Verici anten S11 parametreleri.	22
3.1: Klasik Üçgenleme ile konum tespiti.	24
3.2: Kat planı üzerinde beacon yerleşimi.	25
3.3: Çemberlerin kesişmesi veya kesişmemesi durumları.	26
3.4: Ağırlıklandırma işlemi.	30
3.5: Üçgenleme metodu ile konum tespiti.	31
4.1: Klasik üçgenleme ile konum tespiti (Denklem 2.23 ile).	34
4.2: Klasik üçgenleme ile konum tespiti (Denklem 4.1 ile).	39
4.3: 100ms’de bir 3 kanaldan yayın, alıcının 1sn dinlemede kalması.	41
4.4: 3 frekanstan yapılan yayının kümülatif akım tüketim grafiği.	43
4.5: Tek frekans yayının osiloskop görüntüsü.	43
4.6: 3 frekans yayının osiloskop görüntüsü.	43
4.7: Klasik üçgenleme ile konum tespiti (Denklem 4.2 ile).	49
4.8: Üçgenleme metodu için filtrelemenin yapılması.	51
4.9: Denklem 2.3’teki mesafe hesaplama yöntemi ile ağırlıklandırma.	52
4.10: Denklem 4.1’deki mesafe hesaplama yöntemi ile ağırlıklandırma.	53
4.11: Denklem 4.2’deki mesafe hesaplama yöntemi ile ağırlıklandırma.	53
4.12: Denklem 2.3’deki mesafe hesaplama yöntemi ile trackerın konumu.	54
4.13: Denklem 4.1’deki mesafe hesaplama yöntemi ile trackerın konumu.	54
4.14: Denklem 4.2’deki mesafe hesaplama yöntemi ile trackerın konumu.	55
5.1: Tüm modellerden elde edilen koordinatların katplanı üzerindeki yeri.	59
5.2: 100 farklı konumda alınan ölçümlerin tüm modellerdeki hata payları.	59

TABLÖLAR DİZİNİ

<u>Tablo No:</u>	<u>Sayfa</u>
2.1: Bluetooth Standartları	3
2.2: Kullanılabilir iletim güçleri standartları.	4
2.3: Farklı ortamlar için yol kaybı katsayısı.	15
2.4: Alıcı-verici arasında ölçülen RSSI değerleri.	15
4.1: Şekil 3.2'deki işaretli noktada toplanan RSSI değerleri.	33
4.2: Şekil 3.2'deki tracker ve A1 anchorı arasındaki bazı mesafelerdeki ölçümler.	35
4.3: Şekil 3.2'deki ortamın yol kaybı katsayısı.	36
4.4: Şekil 3.2'deki ortamın her bir anchor için kendi içinde standart sapması.	38
4.5: Şekil 3.2'deki Tracker-Anchor arası mesafe bilgisi.	38
4.6: Şekil 3.2'deki Tracker-Anchor arası mesafe bilgisi.	40
4.7: Alınan yayın-kanal ilişkisi.	41
4.8: Şekil 3.2'deki işaretli noktada toplanan RSSI değerleri (tek frekanstan yapılan yayından toplanan).	44
4.9: Şekil 3.2'deki tracker ve A1 anchorı (tek kanaldan yayın) arasındaki bazı mesafelerdeki ölçümler.	45
4.10: Şekil 3.2'deki ortamın (tek frekanstan yayın yapan anchorlar) yol kaybı katsayısı.	46
4.11: Şekil 3.2'deki ortamın her bir anchor (tek frekanstan yayın) için kendi içinde standart sapması.	47
4.12: Şekil 3.2'deki Tracker-Anchor arası mesafe bilgisi-2.	49
4.13: Şekil 3.2'deki Tracker-Anchor arası mesafe bilgisi-3.	50
4.14: Filtreli üçgenleme ve ağırlıklandırma metodunun konum tespitine faydası.	55
5.1: Bütün modellerin kıyaslanması.	58

1. GİRİŞ

Günümüzde nesnelerin ve kişilerin anlık olarak takibi problemi revaçta olan bir konudur. Aynı zamanda iç mekânda navigasyon özelliği de katma değer oluşturan başka bir ögedir. Kişilerin kapalı alanda varmak istedikleri noktaya bir navigasyon yardımı ile gerçek zamanlı (real-time) olarak yönlendirilmeleri zaman kaybı açısından azımsanamayacak katkılar sağlayacaktır. Gerçek zamanlı konumlandırma sisteminin (Real Time Location System (RTLS)) ana öğeleri aşağıdaki gibi özetlenmiştir:

- Sabit koordinatlara sahip referans noktaları sağlayan temel istasyon ekipmanının koordinatlarına ve bu istasyonlardan alınan işaret gücüne göre aktif mobil birim (tag)'in konumunu tanımlamak mümkündür.
- Aktif tag (radio electronic device) takip edilmesi istenen nesne ya da kişi üzerinde bulunur ve bu aktif tag ile temel istasyonlar arasında bağlantı kurulur.
- Toplanan veriler ışığında; sunucu yazılımı, ölçüm sürecinin yönetimini sağlar, mesafeyi hesaplar ve verilerin hesaplanmasını, işlenmesini ve birikmesini koordine eder.

Bluetooth Low Energy (BLE) teknolojisini kullanan yani, genel olarak beacon olarak adlandırılan cihazlar; yeterince küçük boyutları, düşük pil tüketimi ve düşük maliyetleri sebebiyle temel istasyonlar (anchor) olarak seçilir [3]. Beaconlar, uyumlu bir uygulama veya işletim sistemi tarafından toplanan evrensel olarak benzersiz bir tanımlayıcıyı ileterek BLE yakınlık algılamasını temel alır. Alınan işaret gücü göstergesi (Received Signal Strength Indicator (RSSI)) değeri, beacon (anchor) ve tag (tracker) arasındaki yaklaşık mesafenin hesaplanmasında kullanılır [4]. Beaconlar radyo dalgalarını ilettiğinden, RSSI değeri emilim, girişim ve kırınım etkilerinden etkilenir. Bu durumda, RSSI değerini ortama uygun ve en ideal değerlere çekmek için bazı filtreler veya teknikler kullanılır.

Tag'in konumunun tespiti için iz (fingerprint) alma tekniği, üçgenleme (Klasik Üçgenleme) tekniği vb. teknikler kullanılır.

1.1. Tezin Amacı, Katkısı ve İçeriği

Bir cismin anlık konumunu belirlemek için farklı haberleşme teknolojileri kullanılabilir, bunlar zigbee, wifi, ultra wideband ve bluetooth teknikleridir. Fakat bunların içinde en az güç tüketimi sağlayan bluetooth low energy (BLE) diye adlandırılan haberleşme altyapısıdır. BLE teknolojisi kullanılarak kapalı alanda hassas bir şekilde konumlandırma yapılması amaçlanır.

RSSI optimizasyonu ile iki BLE cihazı arasındaki mesafe hesaplaması bu tez çalışmasında etkili bir şekilde kullanılır ve bunun için birkaç farklı teknik kullanılır, bunlar; log normal shadowing modellemesi sağlanarak ölçümü yapılan mesafe bilgisinin fazla sayıda alınması ve bu değerlerin bazı filtrelerden geçirilmesi ile gerçekleşir.

Belirlenen mesafeden sonra konumlandırma işlemi için farklı yöntemler mevcuttur, bunlar literatürde fingerprint tekniği ve klasik üçgenleme tekniği kullanılarak gerçekleştirilir. Birden fazla farklı anchor'dan mesafe bilgisi alınarak konumlandırma işlemi yapılması daha etkili bir yöntemdir. Tezde üzerinde durulacak olan üçgenleme metodu ve bu metoda özel geliştirilen bir filtreleme de içerikte önemli yer tutacaktır.

Bu tez kapsamında, öncelikle II. bölümde, Bluetooth haberleşme teknolojisinin altyapısı temel olarak incelenmiştir. III. bölümde, RSSI-mesafe modeli bu modele uygulanan yol kaybı modelleri ve konumlandırma için filtreli üçgenleme metodu geliştirilmiş ve deneysel olarak uygulanmıştır. IV. bölümde sonuçlar verilmiştir.

Tezde elde edilen sonuçlar [17]'de yayınlanmıştır.

2. DÜŞÜK ENERJİLİ BLUETOOTH HABERLEŞMESİ

Düşük Enerjili Bluetooth (Bluetooth Low Energy (BLE)) kablosuz haberleşme teknolojisi günümüzde birçok alanda kullanılmaktadır. Ucuz, küçük tasarımlar, estetik görünümde hazırlanan donanımlar ve gerçekleştirilmesi kolay biçimde sağlanması bakımından tercih edilen bir teknolojidir. Bluetooth kablosuz haberleşmesinin altyapısını aşağıdaki başlıklar altında inceleyeceğiz.

2.1. BLE Teknolojisinin Spesifikasyonları

BLE 2011 yılında Bluetooth 4.0 olarak piyasaya çıkmıştır. Adından da anlaşılacağı gibi düşük güç tüketimi özelliğine sahiptir. 2.4 GHz ISM frekans bandında çalışan standart, önceki klasik versiyonlara göre daha az enerji tüketimi sağlamaktadır. Bu sayede de tüketici uygulamalarında küçük batarya boyutlarına sahip olunmasını mümkün kılmaktadır.

BLE yalnızca bağlantı başlangıçlarında aktif olup onun dışında uyku modunda olduğundan az enerji tüketir. Ayrıca önceki versiyonların cihaz bağlantı süreleri 100 milisaniye iken, BLE'nin sadece birkaç milisaniyedir. Bunların dışında tek dezavantajı, düşük enerji tüketimi sebebiyle büyük miktarda veri transferi sağlayamamasıdır.

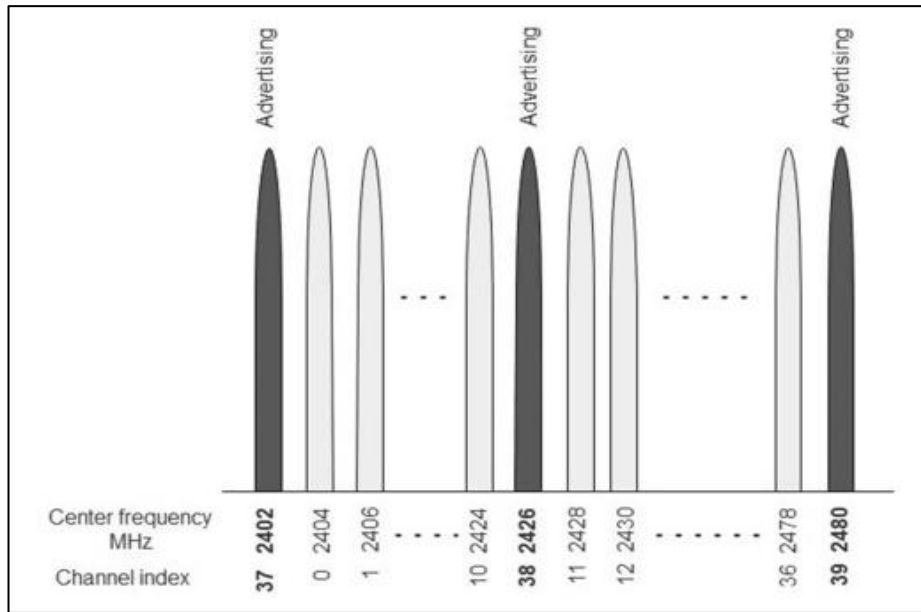
BLE, Bluetooth 4.1, 4.2 ve 5.0 versiyonlarında da aktif olarak kullanılmaktadır. Tablo 2.1'de özellikler ayrıntılı olarak gösterilmiştir [1].

Tablo 2.1: Bluetooth Standartları.

	Hız	Menzil	Çıkış Tarihi	Frekans Bandı
Versiyon 4.1	1 Mbit/s	100 metre	4/12/2013	2.4 to 2.485 GHz
Versiyon 4.2	1 Mbit/s	100 metre	2/12/2014	2.4 to 2.485 GHz
Versiyon 5	2 Mbit/s	300 metre	16/06/2016	2.4 to 2.485 GHz

2.1.1. Frekans Bandı, Kanalları ve İletim Gücü

Standart Bluetooth için 2.4 ile 2.4835 GHz bandında 79 adet 1 MHz aralıklı atlama frekansının aksine, BLE için Şekil 2.1’de gösterildiği gibi 40 adet 2 MHz kanalı üzerinde çalışır. BLE 5'te iki modülasyon şeması tanımlanır: 1 Msps'de (symbol per second) zorunlu bir şema ve 2 Msps'de isteğe bağlı bir şema. 1 Msps şeması 1 Mbps vererek kodlanmamış olabilir veya isteğe bağlı olarak 500 kbps veri hızı için bit başına iki sembol veya 125 kbps veri hızı ile sonuçlanan bit başına sekiz sembol olabilir. Bit kodlaması başına iki sembol seçildiğinde, paketdeki erişim başlığı bit başına 8 sembolle kodlanır. 2 Msps şeması yalnızca 2 Mbps'yi destekleyen kodlanmamış verileri destekler. İletim gücü 0.01 ila 100 mW arasında olmalıdır ve Tablo 2.2'de gösterildiği gibi sınıflandırılmıştır [1].



Şekil 2.1: BLE frekans kanalları.

Tablo 2.2: Kullanılabilir iletim güçleri standartları.

Power class	Maximum output power	Minimum output power in class
1	100 mW (+ 20 dBm)	10 mW (+ 10 dBm)
1.5	10 mW (+ 10 dBm)	0.01 mW (– 20 dBm)
2	2.5 mW (+ 4 dBm)	0.01 mW (– 20 dBm)
3	1 mW (0 dBm)	0.01 mW (– 20 dBm)

2.1.2. Modülasyon tipi

Modülasyon tipi, $BT = 0.5$ ve modülasyon indeksi (taşıyıcıdan anlık frekans sapması, sembol oranının yarısına bölünür) 0.45 ve 0.55 arasında olan Gauss Frekans Kaydırmalı Anahtarlama (Gaussian Frequency Shift Keying (GFSK))'dır. Bant genişliği, 1 Msps hızı için kanal merkezi frekansından 2 MHz ofsetinde -20 dBm'den fazla olmaz ve 2 Msps hızı için 4 MHz ofsetinde -20 dBm'den fazla olmaz.

2.1.3. BLE cihazlarının haberleşme rolleri

BLE cihazlarının dört farklı rolü vardır. Bunlar; broadcaster, observer, peripheral ve central'dır. Bir cihazın rolü denetleyicisinin gereksinimlerini belirler. Bir broadcaster yalnızca verici uygulamaları, örneğin tek yönlü işaretçiler için tasarlanmıştır, ancak bir observer yalnızca almayı destekler. Çevrebirim cihazları (peripheral) düşük karmaşıklığa sahiptir ve tek bir bağlantıyı destekler. En karmaşık rol, çevre birimleriyle birden fazla bağlantıyı başlatabilen ve kontrol edebilen merkezi (central) bir cihazdır. Akıllı telefon, merkezi bir cihaza bir örnektir; çevresel bir cihaz ise merkezi cihaza bağlanan düşük güçlü bir sensör veya düşük güçlü bir işaret olabilir.

Zaman alanı fiziksel kanalı, event olarak bilinen zaman birimlerine bölünür. Veriler, LE cihazları arasında bu eventlerde konumlandırılmış paketlerde iletilir. Dört tür etkinlik (event) vardır: Advertising, periodic advertising, ve connection eventleri. Advertising and connection eventleri aşağıda açıklanmaktadır.

Reklam (advertising) paketleri, diğer cihazlar tarafından görülmek üzere sürekli olarak çevresel bir cihazdan iletilir. Üç reklam PHY kanalından bir veya daha fazlasına reklam paketleri aktaran cihazlara reklamveren (advertiser) denir. Reklam, bağlantı kurulmasını mümkün kılarken cihazların varlıklarını yayınlamalarını sağlar. Desteklenen hizmetlerin bir listesini ve verici güç seviyelerini içerebilir. Reklam etkinliği ile ilişkili parametreler [1]:

- a) Reklam aralığı — 20 ms ila 10240 ms olabilen reklam etkinlikleri arasındaki aralık.
- b) Reklam paketlerinin yayınlanması için 37, 38 ve 39. kanalların hepsi veya sadece 1'i kullanılabilir.

- c) Discoverability (keşfedilebilirlik) - advertiserın diğer cihazlara nasıl görünür olduğunu belirtir.
- d) Connectability (bağlanabilirlik) - advertiserın diğer cihazlara noktadan noktaya bağlanıp bağlanamayacağını belirtir.
- e) Payload - bir reklam paketine eklenebilecek bayt sayısı, 0 ile 31 arasında.

2.2. Alınan İşaret Gücü Göstergesi (Received Signal Strength Indicator (RSSI))

RSSI genellikle alıcı bir cihazın kullanıcısı tarafından görülmez. Ancak, işaret gücü büyük ölçüde değişebildiğinden ve kablosuz ağ iletişimi fonksiyonlarını etkileyebileceğinden, IEEE 802.11 cihazları ölçümü genellikle kullanıcılar için kullanılabilir hale getirir. RSSI değeri tamamen alınan işaret gücünü P_r 'yi ifade etmez. Genellikle çeşitli chipsetler ile bu değer alınan gerçek güce bir offset değeri eklenerek kullanıcıya sunulur. BLE spesifikasyonlarında RSSI için ayrılmış paket boyutu işaretli sayısı temsilen 8 bittir ve 0- 127 arası değişen bir değeri ifade etmektedir. Bazı chipsetler RSSI değerini minimum -100 olarak belirlemiş olabilir.

RSSI genellikle IF yükselticisinden önceki ara frekans (IF) aşamasında türetilir. Sıfır-IF sistemlerinde, temel bant kuvvetlendiricisinden önce temel bant işaret zincirinde türetilir. RSSI çıkışı genellikle bir DC analog seviyesidir. Ayrıca dahili bir analogdan sayısala dönüştürücü (ADC) ve elde edilen kodlar doğrudan, çevresel veya dahili işlemci veri yolu üzerinden de örneklenebilir.

Bir IEEE 802.11 sisteminde RSSI, kablosuz bir ortamda, rastgele birimlerde alınan göreceli işaret gücüdür. RSSI, antenden sonra alıcı radyo tarafından alınan güç seviyesinin ve olası kablo kaybının bir göstergesidir. Bu nedenle RSSI değeri ne kadar büyük olursa, işaret o kadar güçlü olur. Dolayısıyla, bir RSSI değeri negatif bir formda (örneğin -100) temsil edildiğinde, değer 0'a ne kadar yakın olursa, alınan işaret o kadar güçlü olur.

RSSI, kanaldaki radyo enerjisi miktarının, ağ kartının gönderileceği açık (CTS) belirli bir eşik altında olup olmadığını belirlemek için kablosuz bir ağ kartında dahili olarak kullanılabilir. Kartın gönderilmesi netleştikten sonra, bir paket bilgi gönderilebilir. Son kullanıcı, Wireshark, Kismet veya Inssider gibi bir kablosuz ağ

izleme aracı kullanarak bir kablosuz ağıın sinyal gücünü ölçerken bir RSSI değeri gözlemleyecektir.

Herhangi bir fiziksel parametrenin RSSI okuması ile standartlaştırılmış bir ilişkisi yoktur. 802.11 standardı, RSSI değeri ile miliwatt veya desibel cinsinden güç seviyesi arasında bir miliwatt değerinde herhangi bir ilişki tanımlamaz. Satıcılar ve çip seti üreticileri, gerçek güç (miliwatt veya desibel olarak ölçülür) ve RSSI değerleri aralığı (0 ile RSSI maksimumu arası) için kendi doğruluklarını, ayrıntı düzeylerini ve aralıklarını sağlar. 802.11 RSSI metriğinin bir inceliği, nasıl örneklendiğinden gelir: RSSI, tam çerçeve üzerinden değil, yalnızca 802.11 çerçevesinin başlangıç aşamasında alınır.

2000'lerin başlarında, araştırmacılar kaba taneli konum tahminleri için RSSI kullanabildiler. Daha yakın tarihli çalışmalar bu sonuçları daha gelişmiş teknikler kullanarak yeniden üretebilmiştir. Bununla birlikte RSSI her zaman konumu doğru bir şekilde belirlemek için yeterince doğru ölçümler sağlamaz. Aynı zamanda RSSI neredeyse bütün kablosuz düğümlerde mevcut olduğundan ve herhangi bir ek donanım gerektirmediğinden, yerleştirme amaçları için en uygun göstergeyi temsil etmektedir [2].

2.2.1. RSSI –Mesafe İlişkisi

Bir önceki konu başlığında RSSI anlatıldığı üzere, alıcıda oluşturulan RSSI değerinin karşı taraftan advertise yapan cihaz ile arasındaki mesafeyi net bir şekilde verdiği söylenemez. Ortam şartları, anten pozisyonları gibi bazı faktörler alıcı tarafta oluşturulan RSSI değerinin farklı olması durumunu doğurabilir. Bu yüzden tek bir ölçüm ile doğru mesafe ölçümü yapılması mümkün değildir ve çoklu ölçümler ile yaklaşık mesafe bilgisine erişilebilir. Kapalı alan işaret yayılımı için yol kaybı modelleri kullanılarak mesafe bilgisi alınacaktır. RSSI değeri dBm cinsinden bir değerdir ve güç bilgisinin mesafe ile ilgili bir oranı mevcuttur.

2.3. RSSI'a Çoklu Yol Gölgeleme Etkisi

Tipik bir iç mekân ortamında, iletilen bir işaret alıcıya birden çok yol boyunca yayılır. Her yol farklı bir şekilde geciktirilmiş, zayıflatılmış ve faz kaydırmalı işarete

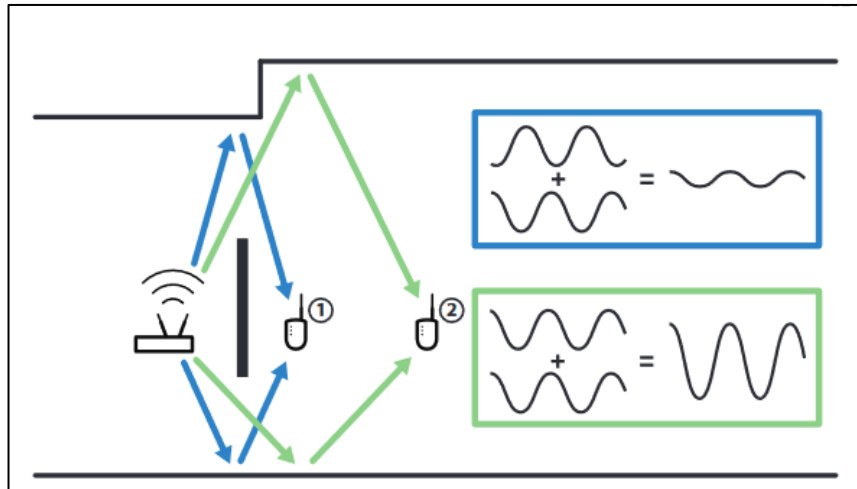
katkıda bulunur. Bu nedenle, alınan işaret, orijinal işaretin çok sayıda aynı işareten farklı genliklerde alınan bir kombinasyonudur. Belirli bir zamanda alıcıda ölçülen karmaşık temel bant işaret gerilimi aşağıdaki gibi ifade edilir [3]:

$$V = \sum_{i=1}^N ||V_i|| e^{-j\theta_i} \quad (2.1)$$

V_i ; i. yoldan alınan işaret gerilim değeri, V ; mutlak toplam gerilim genlik değeridir. Bu değer çoklu yol yayılımı etkisinden dolayı gönderilen işaretin alıcıda alınması muhtemel değerden büyük olması veya küçük olması ile sonuçlanabilir. Şekil 2.2’de çoklu yol yayılımının alıcıda alınan işaret üzerindeki etkisini göstermektedir.

Alıcıda oluşan RSSI değeri şu formül ile ifade edilebilir:

$$RSSI = 10\log(||V||^2) \quad (2.2)$$

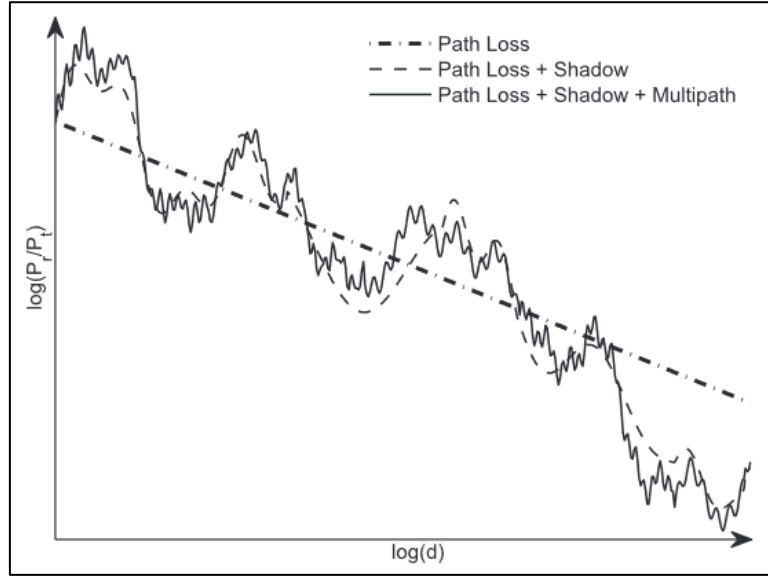


Şekil 2.2: Alınan işarete çoklu yol yayılımı etkisi.

2.4. İşaret Yayılımı, Yol Kaybı ve Sönümlenmesi

Bir iç mekan kanalını modellemenin iki ana bileşeni vardır ve bunlar elektromanyetik yayılımın yansıması, kırınımı ve saçılması ile ilgilidir. Birinci olarak iç mekan yayılım modelini belirleyerek yol kaybının (büyük ölçekli yol kaybı-large scale fading) nasıl belirleneceğini tespit etmek gerekir [4]. Daha sonra, sistemin radyo

performansını bozan değişkenler üzerinde alınan işaret gücü (yani küçük ölçekli sönümleme - small scale fading) olgusunu belirlemek gerekir. Şekil 2.3'te alınan işaretin yol kaybına, çoklu yol yayılımı gölgelemeye ve sönümlemeye maruz kaldığında oluşan işaret yapısı görülebilir.

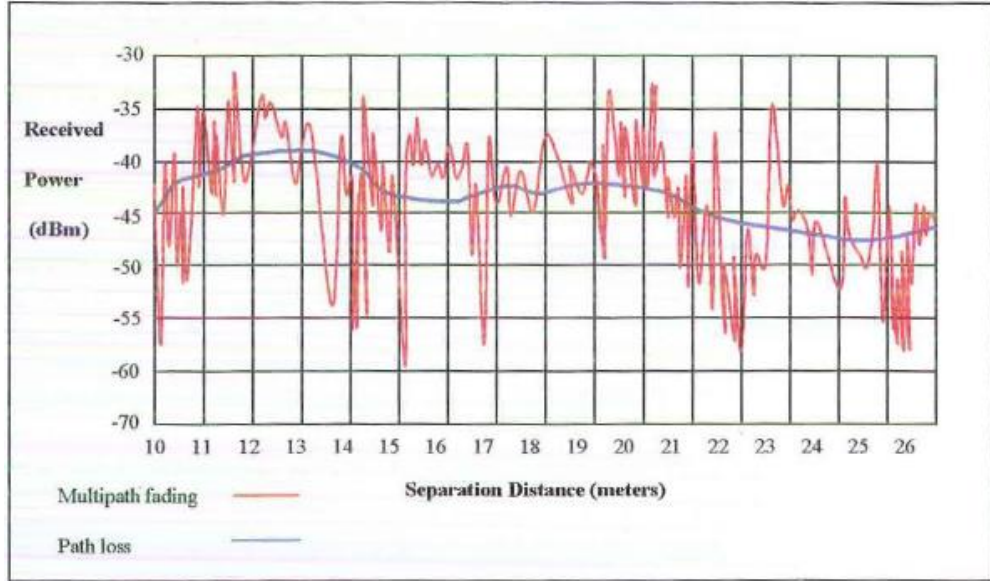


Şekil 2.3: Alınan işaretin maruz kaldığı etkiler.

Yayılma modelleri geleneksel olarak vericiden belirli bir mesafede alınan ortalama işaret kuvvetinin yanı sıra belirli bir yere yakın mekânsal yakınlıktaki işaret kuvvetinin değişkenliğine odaklanmıştır. Rasgele bir verici-alıcı (T-R) mesafesi için ortalama işaret kuvvetini tahmin eden yayılma modelleri, bir vericinin radyo kapsama alanını tahmin etmede yararlıdır ve büyük T-R mesafeleri (birkaç yüzlerce) boyunca işaret gücünü karakterize ettikleri için büyük ölçekli yayılma (Large Scale Spread) modelleri olarak adlandırılırlar. Öte yandan, alınan işaret gücünün çok kısa mesafeleri (birkaç dalga boyu) veya kısa süre süreleri üzerindeki hızlı dalgalanmalarını karakterize eden yayılma modeli, küçük ölçekli sönümleme modelleri olarak adlandırılır.

Şekil 2.4 bir iç mekan radyo haberleşme sistemi için küçük ölçekli sönümlemeyi ve daha yavaş büyük ölçekli varyasyonları göstermektedir. Şekilde alıcı hareket ettikçe (mesafesi arttıkça) işaretin hızla değiştiğini, ancak ortalama işaretin mesafe ile daha yavaş değiştiğine dikkat ediniz. Biz hareketsiz cisimler üzerinden bir model

geliştireceğimiz için büyük ölçekli yayılımı konusu üzerinde durulup bu modele göre RSSI bilgisi edinmeye çalışacağız.



Şekil 2.4: Çok yollu sönümlenme ve yol kaybı.

2.4.1. Boş Uzayda İşaret Yayılım Modeli

Boş uzay yayılım modeli, verici ve alıcı aralarında net, engelsiz bir görüş hattı yoluna sahip olduğunda alınan işaret gücünü tahmin etmek için kullanılır. Çoğu büyük ölçekli-dalga yayılma modelinde olduğu gibi, boş uzay modeli, alınan gücün bir miktar güce yükseltile T-R mesafesinin bir fonksiyonu olarak düştüğünü tahmin eder. Bir verici anteninden d mesafedeki bir alıcı antenin aldığı serbest alan gücü Friis boş uzay denklemi ile verilir [4]:

$$P_r(d) = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2}{(4\pi)^2 d^2 L} \quad (2.3)$$

$P_r(d)$ alıcı verici arasındaki d mesafede alınan işaret gücünü, P_t verici gücünü, G_t verici anten kazancını, G_r alıcı anten kazancını ve L sistem kaybını belirtir ve yayılım ile alakalı değildir ($L \geq 1$). Donanım ile alakalıdır, anten iletim hattı, filtrelerdeki kayıplar, anten kayıpları gibi donanımsal kayıplardır, hiç kayıp olmadığı durumda $L=1$ olur. İşaret zayıflamasını dB cinsinden ölçülen pozitif bir miktar olarak

temsil eden yol kaybı, etkili aktarılan güç ile alınan güç arasındaki fark (dB cinsinden) olarak tanımlanır ve anten kazançlarının etkisini içerebilir veya içermeyebilir. Anten kazancı dahil edildiğinde boş alan modeli için yol kaybı, $L = 1$ kabul edilerek aşağıdaki denklemle ifade edilir:

$$PL (dB) = 10 \log \frac{P_t}{P_r} = -10 \log \left[\frac{G_t G_r \lambda^2}{(4\pi)^2 d^2} \right] \quad (2.4)$$

Anten kazançlarını da 1 olarak kabul edip devam edersek, yol kaybı aşağıdaki denklemle ifade edilir:

$$PL (dB) = 10 \log \frac{P_t}{P_r} = -10 \log \left[\frac{\lambda^2}{(4\pi)^2 d^2} \right] \quad (2.5)$$

Friis boş uzay modeli, sadece verici antenin uzak alanında yer alan d uzaklıkta P_t değerleri için geçerli bir öngörüdür. Bir verici antenin uzak alan veya Fraunhofer bölgesi, verici anten açıklığının ve taşıyıcı dalga boyunun en büyük doğrusal boyutu ile ilişkili olan uzak alan mesafesi d_f 'nin ötesindeki bölge olarak tanımlanır. Fraunhofer mesafesi aşağıdaki denklemle ifade edilir:

$$d_f = \frac{2D^2}{\lambda} \quad , d_f \gg D, \quad d_f \gg \lambda \quad (2.6)$$

D fiziksel olarak antenin en büyük uzunluğudur.

Ayrıca, Denklem 2.3'ün $d = 0$ için geçerli olmadığı açıktır. Bu sebeple, büyük ölçekli yayılma modelleri bilinen (belirlenen) bir güç referans noktası olarak d_0 yakın bir mesafe kullanır (örneğin 1m referans alınır). Alınan güç, $P_r(d)$ herhangi bir mesafeli $d > d_0$ 'da, d_0 'daki P_r ile ilişkili olabilir. $P_r(d_0)$ değeri Denklem 2.3'ten tahmin edilebilir veya telsiz ortamda vericiden yakın bir radyal mesafede d_0 bulunan birçok noktadan ortalama alınan güç alınarak ölçülebilir. Referans mesafe uzak alan bölgesinde olacak şekilde seçilmelidir, yani $d_0 > d_f$ ve d_0 mobil haberleşme sisteminde kullanılan herhangi bir pratik mesafeden daha küçük olacak şekilde seçilmelidir. Böylece, Denklem 2.3 kullanılarak, boş alanda d_0 'dan daha büyük bir mesafede alınan güç,

$$P_r(d) = P_r(d_0) \left(\frac{d_0}{d} \right)^2, \quad d \geq d_0 \geq d_f \quad (2.7)$$

olarak ifade edilir. Alınan güç seviyelerinin geniş dinamik aralığı sebebiyle, alınan güç seviyelerini ifade etmek için genellikle dBm veya dBW birimleri kullanılır.

$$P_{r, dB} = 10 \log(P_r) \quad (2.8)$$

$$P_{r, dBm} = 10 \log\left(\frac{P_r}{1mW}\right) \quad (2.9)$$

$$P_{r, dBm} = 10 \log(P_r) - 10 \log(1mW) \quad (2.10)$$

$$P_{r, dBm} = P_{r, dB} + 30 \quad (2.11)$$

Denklem 2.5 üzerinden devam edilirse $P_r(d)_{dBm}$;

$$P_r(d)_{dBm} = 10 \log \left[\frac{P_r(d_0) \left(\frac{d_0}{d} \right)^2}{1mW} \right], \quad d \geq d_0 \geq d_f \quad (2.12)$$

$$P_r(d)_{dBm} = 10 \log \left[\frac{P_r(d_0)}{1mW} \right] + 10 \log \left[\left(\frac{d_0}{d} \right)^2 \right], \quad d \geq d_0 \geq d_f \quad (2.13)$$

$$P_r(d)_{dBm} = P_r(d_0)_{dBm} + 10 \log \left[\left(\frac{d_0}{d} \right)^2 \right], \quad d \geq d_0 \geq d_f \quad (2.14)$$

Boş uzayda alıcısındaki gücü hesaplamak için ($P_r(d)_{dBm}$); $P_r(d_0)$ ın hesaplanması gereklidir, $P_r(d_0)$ ‘da Denklem 2.3 ile hesaplanır veya d_0 mesafesinde referans olarak tabir edilen alıcısındaki işaret gücü ölçülüp not edilir (d_0 noktasında alıcıda ölçülen güç). En nihayetinde boş uzayda alıcı ve verici arasındaki mesafe biliniyorsa alıcısındaki gücü Denklem 2.14 ile, ya da alıcıda ölçülen güç biliniyorsa, alıcı ve verici arasındaki mesafe Denklem 2.14 ile hesaplanabilir. Boş uzay yol kaybı katsayısı 2’dir ve $\left(\frac{d_0}{d} \right)^2$ ifadesindeki üsttür.

2.5. Pratik Yol Kaybı Modelleri

Çoğu radyo yayılım modeli, analitik ve ampirik yöntemlerin bir kombinasyonu kullanılarak türetilir. Ampirik yaklaşım, ölçülen bir veri kümesini yeniden oluşturan eğri veya analitik ifadelerle dayanır. Bunun avantajı, gerçek alan ölçümleri aracılığıyla hem bilinen hem de bilinmeyen tüm yayılma faktörlerini dolaylı olarak hesaba katar. Bununla birlikte, ampirik bir modelin iletim frekanslarında veya modeli türetmek için kullanılanlar dışındaki ortamlarda geçerliliği, yalnızca gerekli iletim frekansında yeni ortamda ek ölçülen verilerle belirlenebilir. Zamanla mobil haberleşme sistemleri tasarımı için büyük ölçekli kapsamı tahmin etmek için kullanılan bazı klasik yayılma modelleri ortaya çıkmıştır. Alınan işaret seviyesini mesafenin bir fonksiyonu olarak tahmin etmek için yol kaybı modellerini kullanarak, bir mobil haberleşme sistemi için sinyal gürültü oranını (Signal to Noise Rate (SNR)) tahmin etmek mümkün hale gelir.

2.5.1. Log-Distance Yol Kaybı Modeli

Hem teorik hem de ölçüm tabanlı yayılım modelleri, alınan işaret gücünün dış veya iç mekân radyo kanallarında mesafe ile logaritmik olarak azaldığını gösterir. Bu modeller literatürde yoğun olarak kullanılmıştır. Rastgele bir T-R ayrımı için ortalama büyük ölçekli yol kaybı, bir yol kaybı katsayısı, n kullanılarak mesafenin bir fonksiyonu olarak ifade edilir. Örneğin boş uzayda yol kaybı katsayısı 2'dir. Yol kaybı (Path Loss (PL)), $\left(\frac{d}{d_0}\right)^n$ ile doğru orantılıdır, mesafe uzadıkça kayıp artar. d ; T-R arası uzaklık, d_0 ; ölçüm yapılan referans uzaklığı, n ; yol kaybı katsayısıdır [4]. Boş uzay için çıkarılan denklem 2.7'den yola çıkarak ve boş uzayda yol kaybı katsayısı 2'nin yerine, kapalı alan yol kaybı katsayısı n ifadesini yazıp kapalı alan yol kaybını bulalım.

$$P_r(d) = P_r(d_0) \left(\frac{d_0}{d}\right)^n, \quad d \geq d_0 \quad (2.15)$$

Yol kaybı $PL = \frac{P_t}{P_r}$, P_t ; iletilen güç, P_r ; alınan güç olarak hesaplanır. Yol kaybı dB cinsinden aşağıdaki denklemlerle ifade edilir:

$$PL(d)_{dB} = 10\log \left[\frac{P_t}{P_r(d)} \right] = 10\log \left[\frac{P_t}{P_r(d_0) \left(\frac{d_0}{d} \right)^n} \right] \quad (2.16)$$

$$PL(d)_{dB} = 10\log \left[\frac{P_t}{P_r(d_0)} \right] + 10\log \left[\left(\frac{d}{d_0} \right)^n \right] \quad (2.17)$$

$$PL(d)_{dB} = PL(d_0)_{dB} + 10\log \left[\left(\frac{d}{d_0} \right)^n \right] \quad (2.18)$$

$$PL(d)_{dB} = PL(d_0)_{dB} + 10n\log \left[\frac{d}{d_0} \right] \quad (2.19)$$

Bu yol kaybı modelini ele alarak, d mesafede alıcıda alınabilecek güç değerini dBm (miliwat-decibel) cinsinden aşağıdaki gibi yazabiliriz. Denklem 2.15 ile devam edildiğinde aşağıdaki eşitlikler çıkarılır:

$$P_r(d)_{dBm} = 10\log \left[\frac{P_r(d_0) \left(\frac{d_0}{d} \right)^n}{1mW} \right] \quad , \quad d \geq d_0 \quad (2.20)$$

$$P_r(d)_{dBm} = 10\log \left[\frac{P_r(d_0)}{1mW} \right] + 10\log \left[\left(\frac{d_0}{d} \right)^n \right] \quad , \quad d \geq d_0 \quad (2.21)$$

$$P_r(d)_{dBm} = P_r(d_0)_{dBm} + 10n\log \left[\frac{d_0}{d} \right] \quad , \quad d \geq d_0 \quad (2.22)$$

$$P_r(d)_{dBm} = P_r(d_0)_{dBm} - 10n\log \left[\frac{d}{d_0} \right] \quad , \quad d \geq d_0 \quad (2.23)$$

Denklem 2.23 ile d_0 mesafede ölçülen (alınan) güç değeri ile istenilen d mesafesindeki alınan güç değeri bulunabilir. Ancak kapalı alan yol kaybı katsayısı değerini (path loss exponent, n) bilmemiz gerekir. Bu değer Rappaport'un Wireless Coummunications, Principles and Practice kitabında Tablo 3.2'de yer almaktadır. Ortam şartlarına göre bu değer değişir. Aşağıda Tablo 2.3'te farklı ortamlardaki yol kaybı katsayısı değerleri gösterilmiştir [4].

Tablo 2.3: Farklı ortamlar için yol kaybı katsayısı.

Ortam	Yol kaybı katsayısı, n
Boş uzay	2
Kentsel alan hücresel yayın	2.7 ile 3.5 arası
Gölgelenmiş kentsel alan hücresel yayın	3 ile 5 arası
Kapalı alan bina – açık görüş (LOS)	1.6 ile 1.8 arası
Kapalı alan bina – kapalı görüş (NLOS)	4 ile 6 arası
Kapalı alan fabrika – kapalı görüş (NLOS)	2 ile 3 arası

2.5.1.1. Yol Kaybı Katsayısının (n) MMSE ile Belirlenmesi

Alıcıda alınan işaret gücünün alıcı verici arasındaki mesafe bilindiği takdirde hesaplanması veya alıcıda bilinen işaret gücü sayesinde alıcı verici arasındaki mesafenin hesaplanması için alıcı verici arasındaki yol kaybı katsayısı değerinin bilinmesi gerekmektedir. Bu değer bazı ortam şartları için Tablo 2.3'te verilmiştir ancak bu değerler bir aralık belirtmektedir ki, pozisyonlama yapılacak farklı alanlar için bu değer sürekli ölçüm alınıp yeniden belirlenmesi gerekmektedir. Yol kaybı katsayısı değerinin belirlenmesinde MMSE (minumum mean square error) hesaplama metodundan yararlanılacaktır [4]. Ortalama karesel hatasının minimize edilmesi olarak da adlandırılan bu hesaplama yöntemi sayesinde yol kaybı katsayısı hesaplanır. MSE (Mean Square Error) için alıcı verici arasında bazı mesafelerde ölçümler yapılmalı ve not edilmelidir. Örneğin Tablo 2.4'te alıcı ve verici arasındaki mesafeye bağlı olarak ölçüm değerleri elimizde olsun.

Tablo 2.4: Alıcı-verici arasında ölçülen RSSI değerleri.

Alıcı- Verici arasındaki mesafe	Alıcıda ölçümü yapılan güç değeri (RSSI)
1 m	-60 dBm
2 m	-63 dBm
5 m	-75 dBm
8 m	-90 dBm

Bu ölçümlere göre alıcı verici arasındaki ortamın yol kaybı katsayısı değeri MSE ile bulunabilir:

$$MSE = \sum_{i=1}^k (p_i - \hat{p}_i)^2 \quad (2.33)$$

$k = 4$ (örnek sayısı), p_i ; ölçülen güç değerleri ($p_1 = -60dBm$, $p_2 = -63dBm$, $p_3 = -75dBm$, $p_4 = -90 dBm$), $\hat{p}_i$; Denklem 2.23 kullanılarak hesaplanan güç değerlerini ifade eder. Denklem 2.23 kullanılarak ve $d_0 = 1m$ alınarak $\hat{p}_1$, $\hat{p}_2$, $\hat{p}_3$ ve $\hat{p}_4$ değerleri ($p_1(d_0) = p_2(d_0) = p_3(d_0) = p_4(d_0) = -60 dBm$) aşağıdaki gibi bulunur:

- $\hat{p}_1 = p_1(d_0) - 10n \log \left[\frac{d}{1m} \right] = -60 - 10n \log \left[\frac{1m}{1m} \right] = (-60) dBm$
- $\hat{p}_2 = p_1(d_0) - 10n \log \left[\frac{d}{1m} \right] = -60 - 10n \log \left[\frac{2m}{1m} \right] = (-60 - 3n) dBm$
- $\hat{p}_3 = p_1(d_0) - 10n \log \left[\frac{d}{1m} \right] = -60 - 10n \log \left[\frac{5m}{1m} \right] = (-60 - 7n) dBm$
- $\hat{p}_4 = p_1(d_0) - 10n \log \left[\frac{d}{1m} \right] = -60 - 10n \log \left[\frac{10m}{1m} \right] = (-60 - 10n) dBm$

$MSE = (-60 - (-60))^2 + (-63 - (-60 - 3n))^2 + (-75 - (-60 - 7n))^2 + (-90 - (-60 - 10n))^2 = 0 + (-3 + 3n)^2 + (-15 + 7n)^2 + (-30 + 10n)^2 = 158n^2 - 828n + 1134$, MSE'nin minimum olması yani MMSE için, yol kaybı katsayısına göre türevini alıp sıfıra eşitlemek gerekir; yani $\frac{dMSE}{dn} = 0$ işlemi yapılmalıdır.

$$MMSE = \frac{dMSE}{dn} = \frac{d(158n^2 - 828n + 1134)}{dn} = 316n - 828 = 0 \Rightarrow$$

$n = 2,65$ olarak bulunur.

2.5.2. Normal Gölgeleme ile Yol Kaybı Modeli (Log-Normal Shadowing Model (LNSM))

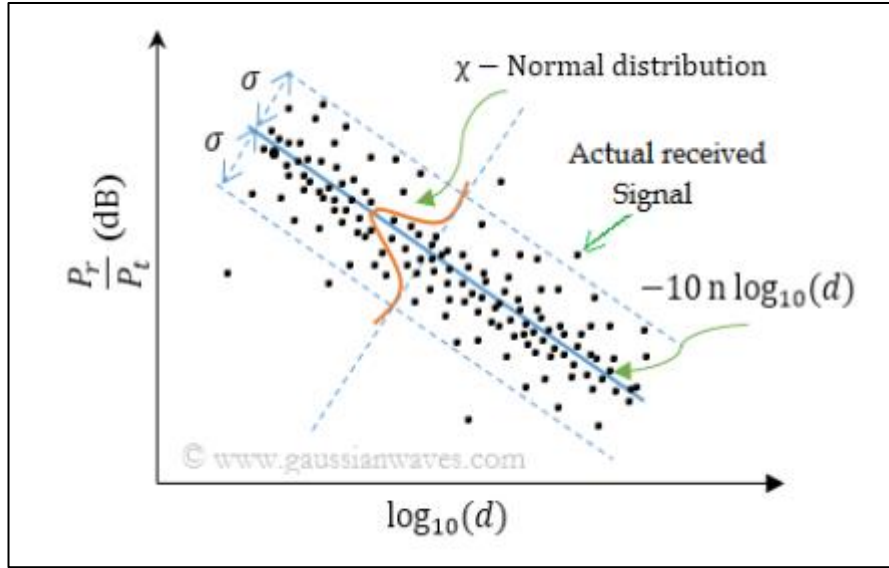
Yol kaybı, alıcı verici arasındaki mesafenin artmasıyla logaritmik olarak artar, başka bir deyişle alıcıda alınan güç alıcı verici arasındaki mesafenin artmasıyla azalır. Log-normal dağılım, aynı tip alıcı vericiye sahip olan, ancak yayılma yolu üzerinde farklı seviyelerde dağınıklığa sahip olan çok sayıda ölçüm yeri üzerinde meydana gelen rastgele gölgeleme etkilerini açıklar. Bu duruma log-normal gölgeleme denir [4].

Gölgelemeye etki eden ortalaması 0, varyansı σ^2 (standart sapması σ) olan Normal (Gauss) dağılımlı değişkenlerdir. Yol kaybı veya alınan güç hesaplanırken bu standart sapma değerini de dikkate almamız gerekir. Belirli noktalardan referans alıp yol kaybı değişkeni hesaplanabiliyorsa, aynı zamanda bu noktada alınan işaretlerin standart sapması da hesaplanıp yol kaybı için değerlendirilmelidir. Denklem 2.19’u (yol kaybı) ve Denklem 2.23’ü (alınan güç) ele alırsak aşağıdaki denklemleri elde ederiz.

$$PL(d)_{dB} = PL(d_0)_{dB} + 10n \log \left[\frac{d}{d_0} \right] + X_\sigma \quad (2.24)$$

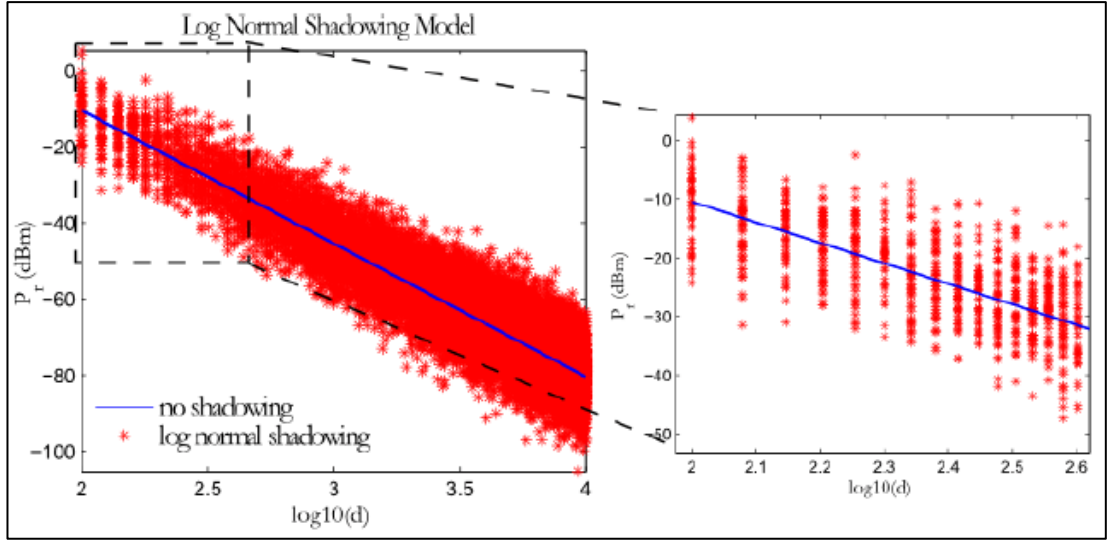
$$P_r(d)_{dBm} = P_r(d_0)_{dBm} - 10n \log \left[\frac{d}{d_0} \right] - X_\sigma \quad (2.25)$$

X_σ ; ortalaması 0, varyansı σ^2 olan gauss dağılımlı X değişkeninin standart sapmasını belirtir. X_σ , standart sapma değeri dB cinsinden bir değer belirtir.



Şekil 2.5: Log- Normal Gölgeleme modeli 1.

$P_r(d)$ dBm cinsinden (dB cinsinden de yazılabilir, sadece $P_r(d_0)$ 'da dB cinsinden yazılması gerekir) ve $PL(d)$ dB cinsinden mesafeye bağlı ortalama etrafında normal dağılıma sahip rastgele değişkenler olurlar. Şekil 2.5 ve 2.6'da da bu durumu anlatan iki grafik bulunmaktadır. Böylelikle Q-fonksiyonu veya hata fonksiyonu (erf),



Şekil 2.6: Log- Normal Gölgeleme modeli 2.

alınan işaret seviyesinin belirli bir seviyeyi aşma (veya altına düşme) olasılığını belirlemek için kullanılabilir. Q fonksiyonu şu şekilde tanımlanır:

$$Q(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_z^{\infty} \exp\left(-\frac{x^2}{2}\right) dx = \frac{1}{2} \left\{ 1 - \operatorname{erf}\left(\frac{z}{\sqrt{2}}\right) \right\} \quad (2.26)$$

$$Q(z) = 1 - Q(-z) \quad (2.27)$$

Alınan işaret seviyesinin ($P_r(d)$) belirli bir γ değerini (belirli bir işaret seviyesini) aşma olasılığı birikimli dağılım fonksiyonu (cumulative density function (CDF)) ile şu şekilde hesaplanır;

$$P_r(d) \sim N(\overline{P_r(d)}, \sigma^2) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(x - \overline{P_r(d)})^2}{2\sigma^2}\right) \quad (2.28)$$

$$P[P_r(d) \geq \gamma] = P(x \geq \gamma) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{\gamma}^{\infty} \exp\left(-\frac{(x - \overline{P_r(d)})^2}{2\sigma^2}\right) dx \quad (2.29)$$

$$t = \frac{x - \overline{P_r(d)}}{\sigma} \quad (2.30)$$

$$P\left(t \geq \frac{\gamma - \overline{P_r(d)}}{\sigma}\right) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{\frac{\gamma - \overline{P_r(d)}}{\sigma}}^{\infty} \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) dt = Q\left(\frac{\gamma - \overline{P_r(d)}}{\sigma}\right) \quad (2.31)$$

$$P [P_r(d) \geq \gamma] = Q\left(\frac{\gamma - \overline{P_r(d)}}{\sigma}\right) \quad (2.32)$$

$$1 - P [P_r(d) < \gamma] = 1 - Q\left(\frac{\overline{P_r(d)} - \gamma}{\sigma}\right) \quad (2.33)$$

$$F_{P_r(d)}(\gamma) = P [P_r(d) < \gamma] = Q\left(\frac{\overline{P_r(d)} - \gamma}{\sigma}\right) \quad (2.34)$$

$\overline{P_r(d)}$; Denklem 2.25'te standart sapma değeri eklenmemiş ortalama değerdir. Yani denklem 2.23'deki formül ile hesaplanıp çıkan sonuç da denilebilir. Yol kaybı katsayısı belirli bir ortamda d mesafe için alıcıda beklenen RSSI'nın (güç değeri) hesaplanması sonucu Denklem 2.23 ile $\overline{P_r(d)}$ değeri hesaplanır.

2.5.2.2. Normal Dağılımın Standart Sapmasının (X_σ) Belirlenmesi

Standart sapmayı belirlemek için yol kaybı katsayısını belirlemede kullanılan teknik kullanılabilir. Yol kaybı katsayısı (n) belirlendikten sonra yine Tablo 2.4'ten faydalanılarak;

$$X_\sigma = \sqrt{\frac{MSE}{k}} = \sqrt{\frac{1}{k} \sum_{i=1}^k (p_i - \hat{p}_i)^2} \quad (2.34)$$

Tablo 2.4'te (Belirli mesafelerde alıcı tarafta alınan ölçüm sonuçları) verilen;
 $p_1 = -60dBm$, $p_2 = -63dBm$, $p_3 = -75dBm$, $p_4 = -90 dBm$ ve yol kaybı katsayısı değeri bilinmeden Denklem 2.23 sayesinde ve Tablo 2.4 deki ölçüm sonuçları ile

- $\widehat{p}_1 = (-60) \text{ dBm}$
- $\widehat{p}_2 = (-60 - 3n) \text{ dBm}$
- $\widehat{p}_3 = (-60 - 7n) \text{ dBm}$
- $\widehat{p}_4 = (-60 - 10n) \text{ dBm}$

değerleri bulunmuştur. Bu durumda MMSE ile belirlenen yol kaybı katsayısı ($n = 2,65$) değeri bu değerleri hesaplamada kullanılabilir:

- $\widehat{p}_1 = -60 \text{ dBm}$
- $\widehat{p}_2 = (-60 - 3 \cdot 2,65) = -68 \text{ dBm}$
- $\widehat{p}_3 = (-60 - 7 \cdot 2,65) = -78,55 \text{ dBm}$
- $\widehat{p}_4 = (-60 - 10 \cdot 2,65) = -86,5 \text{ dBm}$

Denklem 2.34'te bulunan bu değerler yerlerine konulup hesaplama yapıldığında;

$$X_\sigma = \sqrt{\frac{(-60 - (-60))^2 + (-63 - (-68))^2 + (-75 - (-78,55))^2 + (-90 - (-86,5))^2}{4}} = \sqrt{\frac{0 + 25 + 12,6 + 12,25}{4}} = 3,53$$

olarak standart sapma değeri hesaplanır. Verilen bu örnek veya bu ortam (Tablo 2.4) için yol kaybı katsayısı ve standart sapma değeri bulunmuştur. Denklem 2.25'e bu değerler konularak bu ortam için mesafe hesaplaması veya belirlenen mesafede alınması olası RSSI değeri bulunabilir ki şu şekilde bir denklem oluşur:

$$P_r(d)_{dBm} = P_r(d_0)_{dBm} - 26,5 \cdot \log \left[\frac{d}{d_0} \right] - 3,53 \quad (2.35)$$

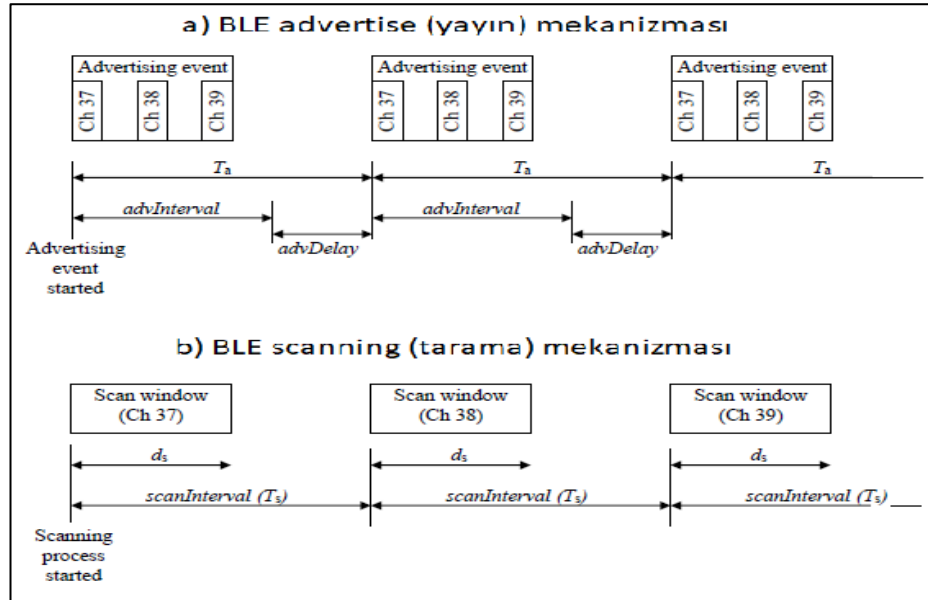
Bu ortam için belirli bir d_0 mesafesi vardır ve bu mesafede alıcıda oluşan RSSI değeri bilinmektedir (Tablo 2.4'te). Bu değerlerde örneğin $d_0 = 1m$ ve bu mesafede alınan işaret gücü -60 dBm Denklem 2.35 de yerine konulursa aşağıdaki ifade elde edilir:

$$P_r(d)_{dBm} = -60 - 26,5 \cdot \log \left[\frac{d}{1} \right] - 3,53 \quad (2.36)$$

Denklem 2.36 ile bu ortamda alınan işaret seviyesi tespiti veya alınan işaret gücünün hangi mesafede alındığı bulunabilir. Standart sapmayı azaltmak için daha fazla örnek almak önemli bir ölçüt olacaktır.

2.6. BLE Cihazının 3 Farklı Frekanstan Yayını

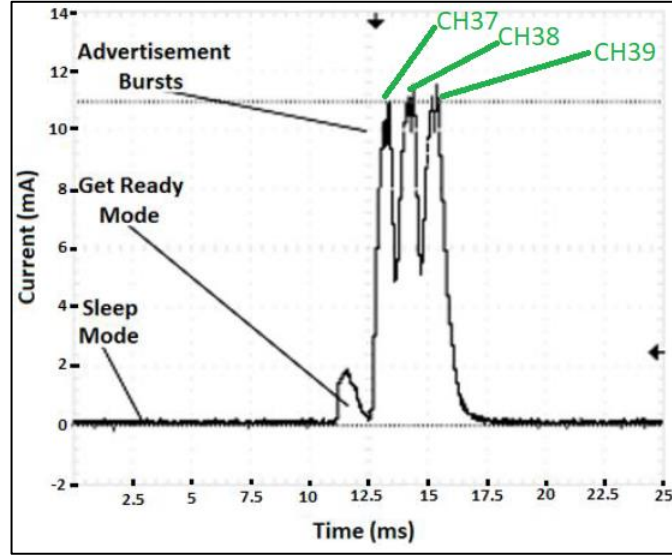
BLE cihazları haberleşmede çeşitleme sağlamak amacıyla geliştirilmiş olan 3 farklı frekanstan yayın (advertise) yapmaktadır. Şekil 2.1’de görüldüğü üzere 2402 MHz (37. Channel), 2426 MHz (38. Channel) ve 2480 (39. Channel) MHz’lerde tek bir yayın işleminde 3 frekanstan da yayın çıkarmaktadır [5], [6]. Alıcı tarafta Şekil 2.7’de gösterildiği üzere ayarlanabilir tarama pencereleri ile yayın yapılan 3 frekans bandı için sırasıyla 37. kanal, 38. kanal ve 39. kanallarda tarama yapmaktadır. Yayın yapan taraf 3 frekanstan birden aynı anda ve peş peşe yayın gerçekleştirdiğinde alıcı taraf o an hangi tarama penceresinde ise (BLE spesifikasyonlarına göre BLE scan pencereleri en az 20 ms genişliğe sahip olabiliyor) yayın yapan tarafın sadece bir frekansını geçirir. Örneğin alıcıda o anda tarama kanalımız 38. kanal yani 2436 MHz için açık ise yayın yapan tarafın 3 yayının hepsi alıcıda oluşmaz, sadece 2426’da yapılan yayını alıcı alabilir. Bu durum BLE haberleşmesinde bir çeşitleme sağlar. Bir sonraki yayın da, alıcı tarafta farklı bir kanala denk gelip o kanaldaki yayın kabul edilebilir, bu işlem çakışmayı azaltmak açısından da önemli bir yere sahiptir.



Şekil 2.7: BLE advertise ve scan frekansları.

3 farklı kanaldan yapılan yayının cihaz üzerinde osiloskop ile akım testi yapılırkenki görüntüsü Şekil 2.8’de gösterilmiştir. Yayına hazırlanış yaklaşık 1,5 ms

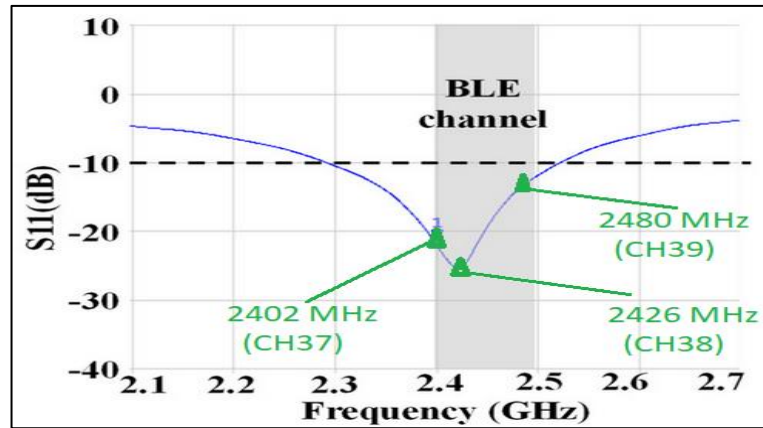
CH37 yayını yaklaşık 1,2 ms CH38 yayını yaklaşık 1,2 ms CH39 yayını yaklaşık 1,2 ms ve toplamda yayın süresi 5,1 ms civarı sürmektedir [5], [6].



Şekil 2.8: Advertise anı akım tüketim grafiği

2.6.1. Yayın Yapılan Frekansın Kullanılan Anten ile İlişkisi

Konumlandırma işleminde son derece önemli rol alan anten yapısı ve performansı, BLE'nin 3 kanaldan birden yayın yapması ile daha da irdelenmesi gereken bir konu haline gelmiştir [7]-[11]. Şekil 2.9'da bir BLE yayın yapan cihaz için anten parametrelerinin Network analizör sonucu gösterilmiştir.



Şekil 2.9: Verici anten S11 parametreleri.

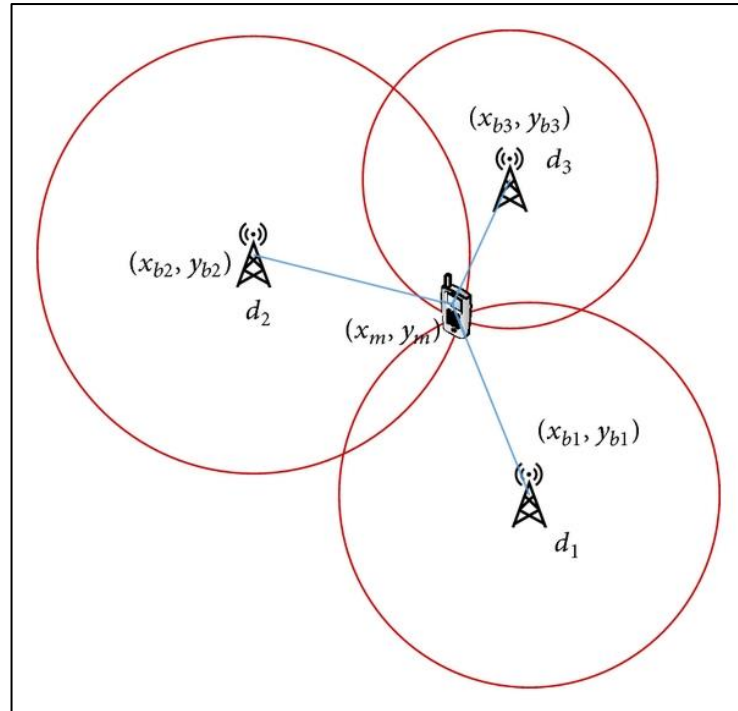
S11 parametrelerine göre -10 dB altında kalan frekanslarda %90 verimli bir şekilde yayın yapılabilir. Ancak BLE farklı frekanslarda yayın yapabildiği için 3 farklı frekansında S11 parametresine dikkat edilirse, 3 frekansın da kendine özel S11'i (Return Loss) bulunmaktadır. Şekil 2.9'a göre 2.426 GHz'te yani 38. kanalda yapılan yayının gücünün vericiden diğer kanallara göre (37 ve 39'a göre) daha yüksek olması beklenmektedir.

3. KONUMLANDIRMA

Bir cihazın (tracker) konumunun belirlenmesi için en az 3 farklı yayın yapan cihaz (anchor) ile haberleşmesi gerekmektedir. Trackerda anchorlardan gelen işaretler sonucunda oluşan RSSI değerleri kullanılarak tracker (konumu belirlenecek cihaz) ile anchorlar arasında LSNM tekniği ile mesafe belirlenir. Bu bilgiler ışığında cihazın (cihazı taşıyan kişinin veya nesnenin) konum tespiti yapılabilmektedir.

3.1. Klasik Üçgenleme Tekniği ile Konum Tespiti

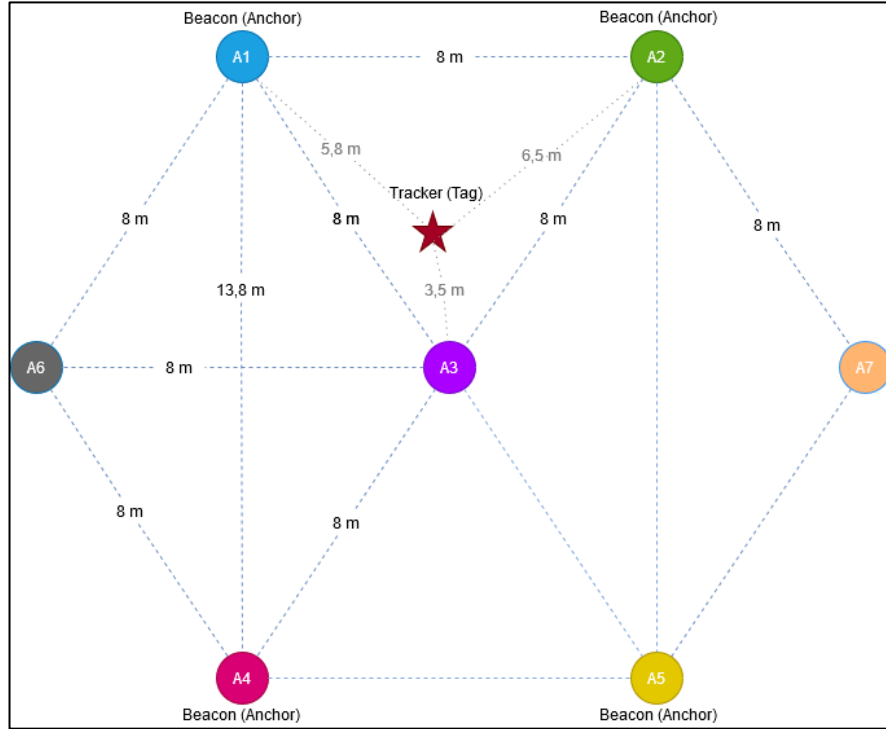
Klasik üçgenleme, üç dairenin kesişim noktasını hesaplamaya yarayan bir tekniktir [12]. Yayın yapan cihaz ile yayın alan cihaz arasında oluşan RSSI değerleri kullanılarak mesafe tahmin tekniği sayesinde hesaplanan mesafeler sonucunda her bir yayın yapan cihaz (koordinatları bilinen cihazlar) etrafında hesaplanan mesafe (yarıçap) kadar çemberler oluşturulur, bu çemberlerin kesişim noktasının bulunmasıyla üçgenleme tekniği kullanılmış olur. Şekil 3.1’de 3 adet yayın yapan istasyon ve bir alıcı ile üçgenleme tekniği gösterilmiştir.



Şekil 3.1: Klasik üçgenleme tekniği ile konum tespiti.

BLE’de konumlandırma algoritmalarının farklı yapılarda olmasının bir sebebi RSSI değerlerinin yayın yapan cihaz-yayın alan cihaz (T-R) arasındaki mesafeyi doğru bir şekilde verememesidir. RSSI değeri ortama göre farklılık gösterebilir. Bu yüzden farklı teknikler (örneğin fingerprint) geliştirilmiştir [12]-[16]. Bu tez çalışmasında, RSSI dengesini sağlayabilmek için ortalama filtre algoritması, konum tespiti için üçgenleme algoritmasını farklı bir yapıda kullanarak (filtreli üçgenleme metodu) daha doğru bir konum tespitinin yapılması amaçlanmıştır. Üçgenleme metodunda en az 3 çemberin bir noktada kesişmesi gerekir. Bu durum, bazen ölçülen RSSI değerleriyle mümkün olmayabilir ve bu sonuca istinaden kesişmeyen çemberlerden bir konum verisi oluşturulamayabilir. Geliştirdiğimiz teknik ile üçgenlerin kesişmesi gerekmemektedir, hatta üçgen oluşturmak için anchorlar etrafında çember oluşturmaya da gerek yoktur.

Beaconların tx power (yayın gücü) değerlerine göre yerleşimdeki beaconlar arası mesafeler değişebilmektedir. BLE standartlarında -40 dBm ve $+10$ dBm arasındaki güç seçeneklerinde yayınlara izin verilmektedir. Bu çalışmada tx power değeri -4 dBm olarak kullanılmıştır ve bu güç düzenine göre hem beaconların enerji tüketimleri düşürülmüş hem de konum hassasiyeti yakalanması bakımından anchor yerleşimi sık bir şekilde kat planı üzerine Şekil 3.2’deki gibi yerleştirilmiştir.



Şekil 3.2: Kat planı üzerinde beacon yerleşimi.

3.2. Filtreli Üçgenleme ve Ağırlıklandırma Metodu

Alıcı tarafta, yayın yapan cihazlardan gelen yayın neticesinde oluşan güç seviyesi ve bu güç seviyesine bağlı olarak yayın yapan cihaz ile alıcı cihaz arasında mesafe hesaplaması yapılır. Bu işlem alıcı tarafa indüklenen tüm yayınlar için yapılır. Şöyle ki her bir yayın yapan cihazın alıcı tarafta güç indüklenmesi oluşuyorsa bu yayın yapan cihazlar ile alıcı cihaz arasında mesafeler hesaplanabilir. Mesafe hesaplaması LNSM ile yapıldıktan sonra Şekil 3.3'teki gibi farklı varyasyonlarda çemberlerin kesişmesi veya kesişmemesi gibi durumlar meydana gelebilir. Üçgenlerin kesişmediği durumlarda konum oluşturmamak tercih edilebilir ancak bu durum çok sık meydana geliyorsa bu durumu da değerlendirip çemberler kesişmese bile konum oluşturabilecek bir yapı kurulabilir.



Şekil 3.3: Çemberlerin kesişmesi veya kesişmemesi durumları.

3.2.1. Filtrenin Belirlenmesi

Filtreli üçgenleme metodu ilk başta şunu önerir; konum tespiti için çember oluşturmaya gerek yoktur. Alınan işaret gücüne göre, yayın yapan cihazlar arasında bir ağırlıklandırma metodu sunar. Böylelikle çemberlerin kesişmesi şartı ortadan kalkar. Bu durumu şöyle örneklendirebiliriz:

Şekil 3.2'deki yayın yapan cihazlardan (beacon, anchor) 4 tanesinden t anında ölçüm (RSSI) alındığı farz edilerek (kırmızı yıldızlı noktada-tracker); ölçüm alınan anchorlar A1, A2, A3, A4 anchorları ve bu ölçüm sonuçları ile tracker-anchor arasındaki mesafeler LNSM ile hesaplanır. Bu ortamda 4 anchor'dan işaret bilgisi alındığından bu anchorların isimleri (id) alıcı cihazda bilinir. Sabit olan anchorların kat planı üzerindeki konumları (x, y koordinatları) bilinir. Mobil ve konum tespiti yapılacak olan cihaz tracker sabit değildir. Mobil olan tracker, ölçüm sonuçlarını sunucuya aktarır ve sunucuda trackerın konum tespiti yapıp kat planı üzerinde konumu gösterilir. Sunucuda kat planı bilgisi, kat planı üzerinde anchorların koordinatları önceden kaydedilmiş olması gerekmektedir. Sunucuya tracker'dan gelen, tracker-anchor arasındaki ölçüm bilgisi ve trackerın ölçüm aldığı anchorların isimleri (id'leri) gönderilir ve sunucuda artık hesaplamalar yapıp konum tespiti (koordinat oluşturma) sağlanır. Yapılan hesaplamadan kasıt filtreli üçgenleme ve ağırlıklandırma metodundan başka bir şey değildir.

Tracker'dan sunucuya gönderilen ölçüm sonuçları ile ilk önce şu hesaplanır: Anchorlar arası mesafeler; yani koordinatı bilinen bu 4 anchorın kendi aralarındaki mesafeleri:

- A1-A2 anchorları arası mesafe $\rightarrow 8$ m
- A1-A3 anchorları arası mesafe $\rightarrow 8$ m
- A1-A4 anchorları arası mesafe $\rightarrow 13,8$ m
- A2-A3 anchorları arası mesafe $\rightarrow 8$ m
- A2-A4 anchorları arası mesafe $\rightarrow 16$ m
- A3-A4 anchorları arası mesafe $\rightarrow 8$ m'dir.

Trackerdan gelen anchor bilgisine göre bu 4 anchor için hesaplama yapılır. 3 anchor (A,B,C) için bilgi gelseydi; A-B, A-C, B-C anchorları arasında 3 adet mesafe hesaplaması oluşurdu.

Filtreli üçgenleme ve ağırlıklandırma metodunda geçen filtre kelimesinin görevi burada ortaya çıkar. İlk önce buradaki filtre değeri kat planına yerleştirilen anchorların arasındaki mesafeye göre belirlenir. Kat planı üzerine yerleştirilen anchorlardan sadece bir tanesi göz önüne alınsın, bu anchorın kendine en yakın anchor ile arasındaki mesafe nedir? Şekil 3.2'deki kat planına göre 8 m'dir. Bu duruma binaen buradaki, filtre değeri 8 m'den büyük olmalıdır: Örneğin filtre değeri 9 m olsun. 6 adet anchorlar arası (A1-A2, A1-A3, A1-A4, A2-A3, A2-A4, A3-A4) mesafeler içinden bazıları bu filtre değerine takılabilir ya da bütün mesafeler filtreden küçükse takılmayabilir. Ancak bu senaryoya göre A1-A4 ve A2-A4 mesafeleri 9 m filtresine takılacaktır. Buradaki ölçüt, belirlenen filtre değerinden (9 m), hesaplanan mesafeler büyük ise bu büyük olanlar filtreye takılacak ve bu filtreye takılan ölçümler için bir veya birden fazla anchor eleme işlemine gidilecektir. Eleme sonrasında geriye kalan 3 anchor ile ağırlıklandırma ve üçgenleme metodu ile konum tespiti sağlanacaktır. Şimdi filtreye takılan 2 değer mercek altına alındığında; şu soruya cevap verilmesi gerekecektir: Hangi anchor bu yüksek mesafe değerine sebebiyet veriyor? Bunun yanıtı şu şekilde bulunur, hangi cihazın ismi bu filtre sonucunda daha fazla gözükürse o cihaz (acnhor) elenecek anchor olur. Bu örneğe göre filtreye takılan A1-A4 ve A2-A4 ölçümlerinde A1 anchorının ismi 1 kere, A2 anchorının ismi 1 kere, A4 anchorının ismi 2 kere geçmektedir. Her iki ölçümde de A4 anchorı bulunmaktadır.

Aslında anlatılmak istenen bu uzun mesafelerin filtreye takılmasına sebebiyet veren anchorın hangisi olduğunu bulmak ve bu anchorı bulduktan sonra bu cihaza ait tracker-anchor (A4) RSSI ölçüm metriğini konum tespitinde hesaba katmamaktır ki, bunun getirdiği çok fazla avantaj mevcuttur. Örneğin, eğer bu cihazdan (A4) diğer anchorlara nazaran daha yüksek bir RSSI değeri alınmış olsaydı, konum tespiti yapılırken trackerın konumu A4 anchorına daha yakın bir yerde olurdu. Eğer bir noktada ölçümler alınıyorsa ve bu ölçümler sonucunda birbirine en yakın 3 anchor (kümelenmiş anchorlar) bu filtreleme metoduyla bulunabiliyorsa, artık konum tespiti noktasında çok daha avantajlı bir noktaya gelinmiş olur. Net bir şekilde görülür ki kırmızı yıldızlı noktadayken (tracker) kendine en yakın 3 anchor (A1, A2, A3) en iyi RSSI değerleri alınması gerekmektedir ve bu anchorlara yakın bir yere konum

tespiti yapılması daha doğru olacaktır. Burada çok farklı senaryolar da ortaya çıkabilir. Örneğin, kırmızı yıldızlı noktada ölçüm alınırken A3 numaralı anchorlardan değil de A5 numaralı anchorlardan ölçüm alınabildi, A3 numaralı anchorın farklı sebeplerden dolayı ilettiği gücü tracker tarafında alınamadı. Bu durumda nasıl bir filtre uygulanır? Aynı şekilde kullanılan metod devreye girer:

- 1- Anchorlar arası mesafe hesaplanır.
- 2- Filtreye takılan anchorlar arası mesafeler bir kenara alınır.
- 3- Bu filtreye takılan ölçümlerde en fazla ismi geçen cihaz ayıklanır, eğer isimlerde eşitlik varsa en kötü RSSI'ya sahip (anchorın trackerda oluşturduğu RSSI) olan cihazda elemeye gidilir.
- 4- Geriye kalan 3 anchor ile konum tespiti sağlanır.

EK A'da alandaki anchor konumlarının farklı yerleştirilmesi durumunda oluşacak filtreleme işinin nasıl yapıldığı daha detaylı aktarılmıştır.

3.2.2. Ağırlıklandırmanın Sağlanması

Ağırlıklandırma işlemi anchorlar arasında gerçekleşir. Ağırlıklandırma katsayıları trackerda anchorlardan alınan işaret seviyesine (RSSI) bağlı verilir. Alınan RSSI değeri LNSM denkleminde verilir ve bir mesafe değeri ortaya çıkar; bu mesafeler ile ağırlıklandırma sağlanır. Örneğin; A1 anchorı için alınan RSSI'ya göre X m hesaplanmış olsun (LNSM'ye göre), A2 anchorı için Y m, A3 anchorı için Z m.

- 1- Bu durumda tracker A1-A2 anchorı arasında $(x1, y1)$ bir yerde konumlandırılmak istense hangi noktada konumlandırılması daha uygun olur sorusuna yanıt aranır. A1 ve A2'nin katsayısı bilindiği, A1 ve A2'nin koordinatları da belli olduğu için aşağıdaki formül ile;

$$\frac{X}{X+Y} * (A1 - A2 \text{ arası mesafe}) \text{ m olarak trackerın A1 anchorına uzaklığı}$$
$$\text{hesaplanır, A2 anchorına olan uzaklığı da } (A1 - A2 \text{ arası mesafe}) - \frac{X}{X+Y} * (A1 - A2 \text{ arası mesafe})$$

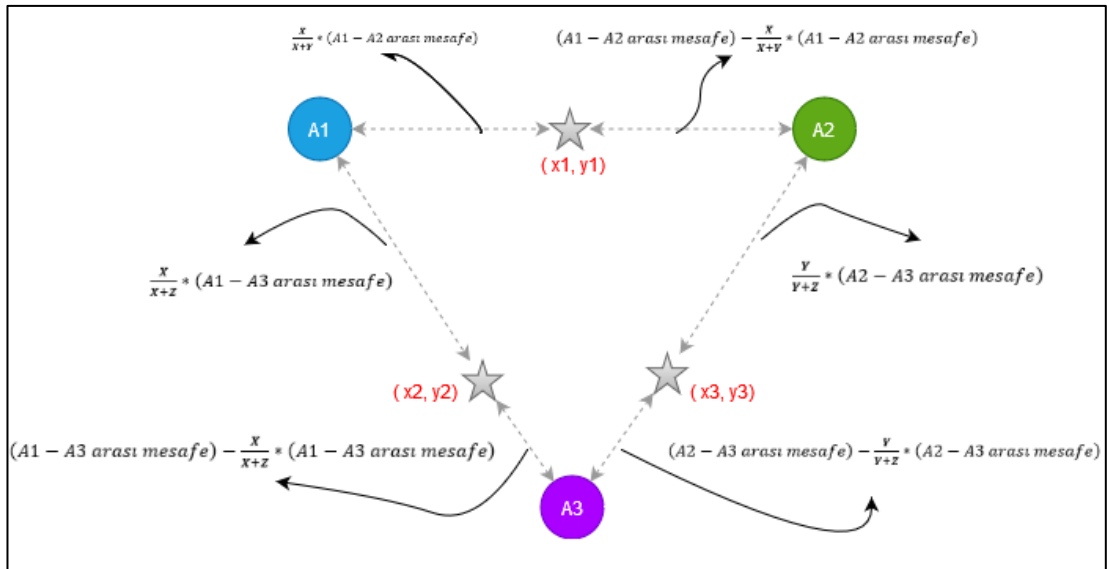
olarak çıkar. Yani bu cihaz A1-A2 anchorı arasında bir noktaya konumlandırılmak istenirse, anchorlara bu uzaklıktaki mesafeye konumlandırılması gerekir.

2- Aynı şekilde A1-A3 arasında (x_2, y_2) bir noktaya konumlandırılması durumunda A1'e $\frac{X}{X+Z} * (A1 - A3 \text{ arası mesafe})$ m,

A3'e $(A1 - A3 \text{ arası mesafe}) - \frac{X}{X+Z} * (A1 - A3 \text{ arası mesafe})$ uzaklıkta olur.

3- Aynı şekilde A2-A3 arasında (x_3, y_3) bir noktaya konumlandırılması durumunda A2'ye $\frac{Y}{Y+Z} * (A2 - A3 \text{ arası mesafe})$ m,

A3'e $(A2 - A3 \text{ arası mesafe}) - \frac{Y}{Y+Z} * (A2 - A3 \text{ arası mesafe})$ uzaklıkta olur. Bu mesafeler Şekil 3.4'te gösterilmiştir.



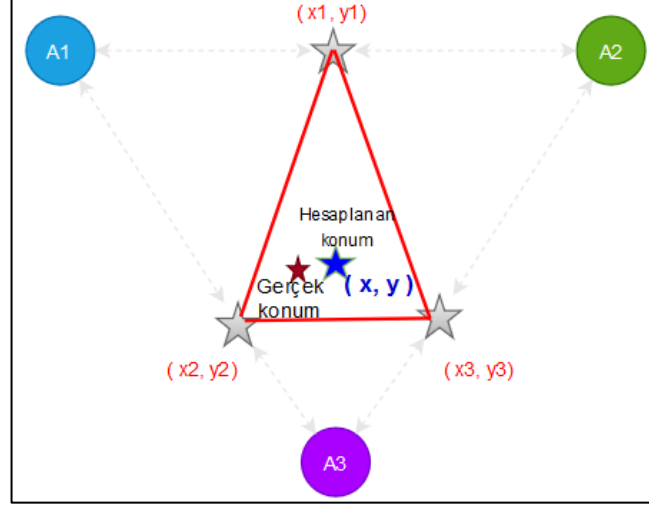
Şekil 3.4: Ağırlıklandırma işlemi.

3.2.3. Üçgenleme ile Konum Tespiti

Filtreden geçmiş ve ağırlıklandırmaları yapılmış cihazlar için son aşama kalmıştır. 3 farklı koordinat sayesinde (A1-A2, A1-A3 ve A2-A3 anchorları arasındaki ağırlıklandırma yöntemi ile bulunmuş 3 koordinat $((x_1,y_1), (x_2,y_2), (x_3,y_3))$, nokta) üçgenin ağırlık merkezinin bulunması gibi kolay bir yöntem ile nihai konum oluşturulur. Koordinatları (x, y) bilinen 3 noktanın ağırlık merkezinin bulunması şu şekilde olur:

$$(x, y) = \left(\frac{x_1 + x_2 + x_3}{3}, \frac{y_1 + y_2 + y_3}{3} \right) \quad (3.1)$$

Denklem 3.1'deki formül ile bulunan koordinat bilgileri ile trackerın kat planı üzerindeki yeri yaklaşık tespit edilmiş olur. Bu durum Şekil 3.5'te gösterilmiştir.



Şekil 3.5: Üçgenleme metodu ile konum tespiti.

4. SAYISAL ÖRNEK ve SONUÇLAR

Normal şartlarda BLE haberleşmesi ile konumlandırma yapılırken şu yöntemler izlenir: Sabit olan BLE cihazları (anchor) yayın yapar, tracker (BLE cihazı) gelen yayınları toplar ve tek bir anchor'dan gelen tüm yayınların ortalama değerini alıp bir RSSI değeri oluşturur. Bu işlem tüm anchorlardan gelen yayınlar için yapılır. Örneğin, bir anchor 100 ms'de bir (BLE standartlarında bu işlem en az 20 ms, en çok 10 sn) yayın yapsın, yani advertise yapma aralığı 100 ms olsun. Alıcı taraf tracker (mobil), yayınları toplamak için 1 sn boyunca tarama işlemi yapsın ve topladığı yayınları (RSSI'ları) sunucuya göndersin bir sn tarama (dinleme) işleminde bir sn değerinin seçilmesinin sebebi mobil haldeki cihazın canlı takibini sağlamaktır.

4.1. Yol Kaybı Katsayısı Belirlenmeden Yapılan Konumlandırma

Yayın yapan cihazların her birinden mobil olan cihazda (tracker) en fazla 10 örnek değer (RSSI, güç değeri) oluşacaktır. Bu oluşan RSSI değerlerinin ortalaması alınıp her bir anchor için ortalama RSSI değeri hesaplanır. Kapalı alanda yol kaybı katsayısı değeri örnek olarak 3 gibi sabit alınır (Tablo 2.3). Referans mesafe değerinin, yani 1m de -60 dBm RSSI değerinin (ofis ölçümüne göre yapılmıştır) sabit kılınması ile Denklem 2.23 kullanıldığında, herhangi bir bölgede anchorlardan alınan RSSI değerlerinin ortalaması neticesinde çıkan RSSI değeri ile mesafe hesaplaması yapılabilir. Fakat buradaki sabit değerler, $n = 3$ ve referans RSSI değeri -60 dBm, her ortam şartları için aynı olmayacaktır. Ancak bu kullanım ortalama bir kullanım olup konum hassasiyeti beklentisi olmayan şartlarda kullanılabilecek bir yöntem olmaktadır. Konum hassasiyeti yakalamak için hem bu ölçümlerin sahada tek tek yapılması hem de konumlandırma algoritmasına önermiş olduğumuz filtreli ağırlıklandırılmış üçgenleme metodunun kullanılması gerekmektedir. Dolayısıyla sonuçlarımızda bu kıyaslama fazlasıyla göze çaracaktır.

Burada dikkat edilmesi gereken diğer bir husus Bölüm 2.6.1'de bahsi geçen konudur. Normal şartlarda BLE cihazının (anchorın) aynı zaman diliminde (5ms içinde, Şekil 2.9) peş peşe yapmış olduğu yayın frekansları 2402MHz (CH37), 2426MHz (CH38), 2480MHz (CH39)'dir. Eğer BLE ile konumlandırma yapılacak ise

tek bir frekanstan yayın yapıp o frekansın alıcısındaki karşılığına (RSSI) bakmak daha doğru olacaktır. Hâlihazırda kullanılan sistemin perspektifini göz önüne alalım:

Şekil 3.2’deki anchor yerleşimi ve kat planına göre kırmızı yıldız olan noktadan alınan ölçüm sonuçları NLOS bir ortamda meydana gelmiştir. Ayrıca anchor tarafından 3 frekanstan birden yayın yapılmaktadır. Tracker tarafında alınan işaretlerin (RSSI) hangi frekansta alındıkları bilinmemektedir. Tablo 4.1’de toplanan RSSI değerleri verilmiştir.

Tablo 4.1: Şekil 3.2’deki işaretli noktada toplanan RSSI değerleri.

zaman		A1(anchor)	A2(anchor)	A3(anchor)	A4(anchor)	
100. ms	tracker	-76	-80	-69	-76	dBm
200. ms	tracker	-75	-84	-	-79	dBm
300. ms	tracker	-78	-73	-73	-83	dBm
400. ms	tracker	-79	-	-66	-90	dBm
500. ms	tracker	-90	-81	-65	-71	dBm
600. ms	tracker	-92	-83	-77	-78	dBm
700. ms	tracker	-79	-88	-75	-86	dBm
800. ms	tracker	-79	-74	-	-77	dBm
900. ms	tracker	-85	-76	-66	-80	dBm
1000. ms	tracker	-87	-72	-69	-80	dBm
	Ortalama RSSI	-82	-79	-70	-80	dBm

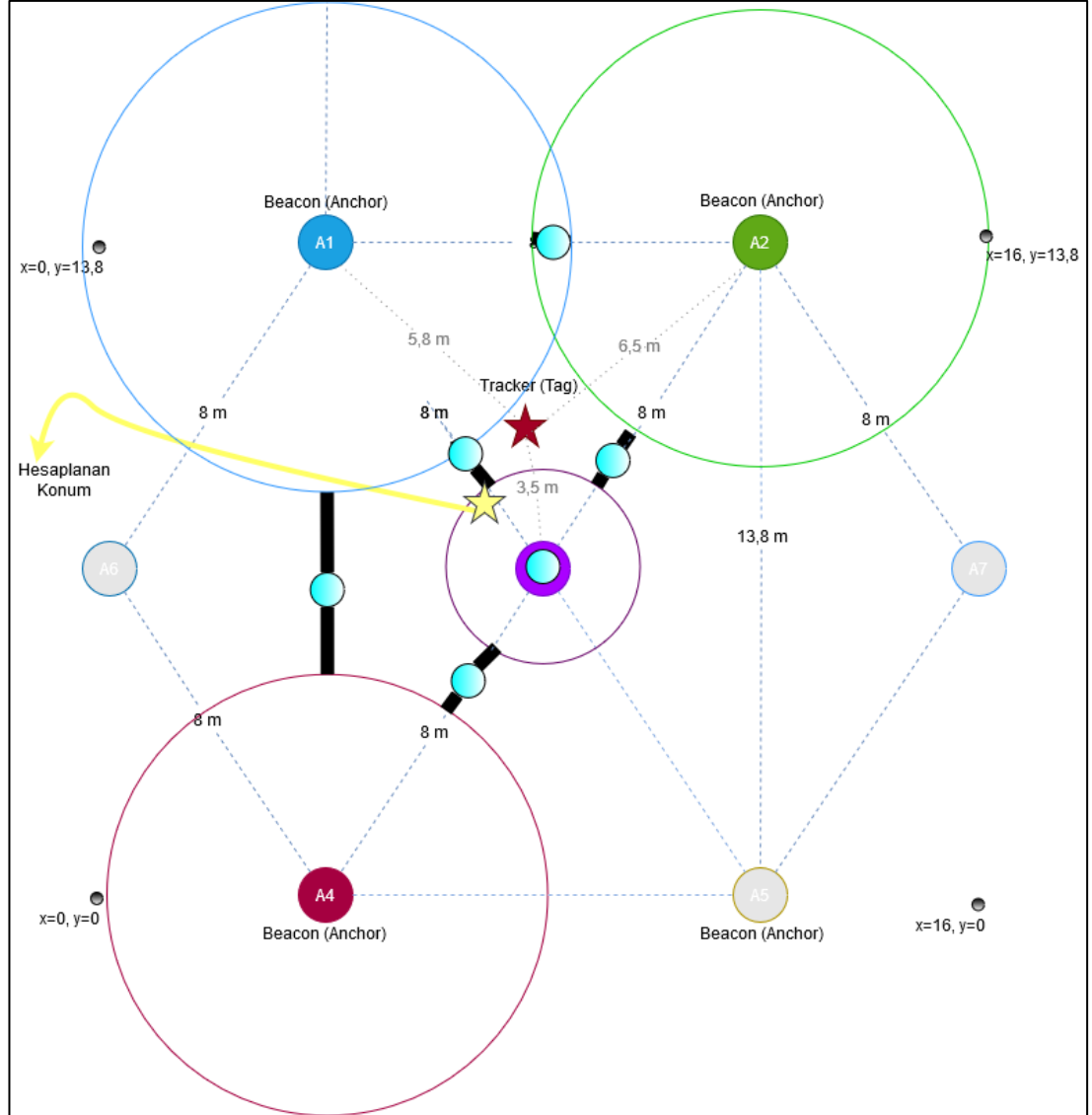
Bu sonuçlar neticesinde ölçülen RSSI değerleri Denklem 2.23’te yerine konularak her bir anchor-tracker uzaklığı bulunmaktadır:

$$P_r(d)_{dBm} = P_r(d_0)_{dBm} - 10n \log \left[\frac{d}{d_0} \right], P_r(d_0)_{dBm} = -60dBm, n = 3, d_0 = 1m$$

$$\text{olacak şekilde } P_{r-A1}(d)_{dBm} = -60 - 30 \log \left[\frac{d}{1} \right] \rightarrow d_{r-A1} = 10^{\frac{-60 - P_{r-A1}(d)_{dBm}}{30}};$$

- $d_{r-A1} = 10^{\frac{-60 - (-82)}{30}} = 5,41 m$
- $d_{r-A2} = 10^{\frac{-60 - (-79)}{30}} = 4,29 m$
- $d_{r-A3} = 10^{\frac{-60 - (-70)}{30}} = 2,15 m$
- $d_{r-A4} = 10^{\frac{-60 - (-80)}{30}} = 4,64 m$

olarak tracker ile 4 anchor arasındaki mesafe bulunmuş olur. Bu hesaplar neticesinde cihazın kat planı üzerindeki gerçek konumu $x = 7.8$ m, $y = 10.2$ m olan trackerın (kırmızı yıldızlı nokta) klasik üçgenleme metodu ile konum tespiti yapıldığında (Şekil 4.1’de gösterilmiştir) hesaplanan konumunun (sarı yıldızlı nokta) $x = 6.7$ m, $y = 8$ m olarak çıktığı görülmüştür. Buradaki hata miktarı (sapma değeri) $\sqrt{(7.8 - 6.7)^2 + (10.2 - 8)^2} = 2.46$ m’dir.



Şekil 4.1: Klasik üçgenleme ile konum tespiti (Denklem 2.3 ile).

4.2. Yol Kaybı Katsayısı ve Normal Dağılımın Standart Sapmasının Kullanılması (LNSM) ile Yapılan Konumlandırma

Ortamdaki yol kaybı katsayısı için standart bir değer olan 3 sayısı kullanılmış ve bu değer ile Denklem 2.23 kullanılarak mesafe hesaplaması yapılmıştır. Ortamdaki yol kaybı katsayısını Tablo 4.2’de bulunan tracker ve anchor arasında bazı mesafelerdeki ölçümler kullanılarak hesaplanır. Bu değer ile Denklem 2.23 kullanılarak mesafe hesaplaması yapılır. Tablo 4.2’deki ölçümler NLOS ortamda alınmıştır. NLOS’tan kasıt, ortamda bilgisayarlar, masalar ve diğer gereçlerin bulunmasıdır.

Tablo 4.2: Şekil 3.2’deki tracker ve A1 anchorı arasındaki bazı mesafelerdeki ölçümler.

zaman		1 m	2 m	3 m	4 m	5 m	6 m	7 m
100. ms	tracker-A1(anchor)	-61	-63	-70	-66	-76	-74	-75
200. ms	tracker-A1(anchor)	-65	-62	-67	-67	-75	-72	
300. ms	tracker-A1(anchor)	-63	-65	-63	-76	-78	-76	-82
400. ms	tracker-A1(anchor)	-62	-60	-68	-64	-79		-86
500. ms	tracker-A1(anchor)	-69	-69	-72	-68	-90	-84	
600. ms	tracker-A1(anchor)	-61	-66	-72	-75	-92		-79
700. ms	tracker-A1(anchor)	-58	-61	-74	-69	-79	-76	-77
800. ms	tracker-A1(anchor)	-57	-60	-65	-78	-79	-81	-79
900. ms	tracker-A1(anchor)	-57	-59	-78	-76	-85	-85	-83
1000. ms	tracker-A1(anchor)	-61	-70	-72	-79	-87	-90	-87
	Ortalama RSSI	-61,4	-63,5	-70,1	-71,8	-82	-79,8	-81

Bölüm 2.5.1.1’de detaylı olarak belirtilen MMSE yöntemi kullanılarak Tablo 4.2’deki her bir ölçüm zamanı için yol kaybı katsayısı hesaplanır. Örneğin 100. ms’de tracker-anchor arasındaki 1 m, 2 m, 3 m, 4 m, 5 m, 6 m, 7 m’de alınan işaretler ile hesaplanan yol kaybı katsayısı 1.62 çıkar. Bu örnek için referans değer 1 m’de -61 dBm’dir. Aynı şekilde tüm ms’lerdeki ölçümler için de tek tek yol kaybı katsayısı hesaplanmıştır ve nihai olarak 1 sn’deki bütün değerlerin ortalaması alınıp ortalama değer için de bir yol kaybı katsayısı bulunmuş olup Tablo 4.3’te gösterilmiştir.

1 sn içinde alınan bütün örneklerin her metre için RSSI ortalaması alındığında bulunan yol kaybı katsayısı değeri, tek tek bulunan yol kaybı katsayısı değerlerine nazaran daha uygulanması yüksek bir değerdir. Örneğin, 2. örnekleme (200. ms), 4. örnekleme (400. ms), 5. örnekleme (500. ms), 6. örnekleme (600. ms) ‘ler tek başına

Tablo 4.3: Şekil 3.2’deki ortamın yol kaybı katsayısı.

zaman		1 m	2 m	3 m	4 m	5 m	6 m	7 m	Yol kaybı katsayısı (n)
100. ms	tracker-A1(anchor)	-61	-63	-70	-66	-76	-74	-75	1,62
200. ms	tracker-A1(anchor)	-65	-62	-67	-67	-75	-72		-1,66
300. ms	tracker-A1(anchor)	-63	-65	-63	-76	-78	-76	-82	1,81
400. ms	tracker-A1(anchor)	-62	-60	-68	-64	-79		-86	-0,51
500. ms	tracker-A1(anchor)	-69	-69	-72	-68	-90	-84		-1,25
600. ms	tracker-A1(anchor)	-61	-66	-72	-75	-92		-79	0,18
700. ms	tracker-A1(anchor)	-58	-61	-74	-69	-79	-76	-77	2,41
800. ms	tracker-A1(anchor)	-57	-60	-65	-78	-79	-81	-79	2,81
900. ms	tracker-A1(anchor)	-57	-59	-78	-76	-85	-85	-83	3,43
1000. ms	tracker-A1(anchor)	-61	-70	-72	-79	-87	-90	-87	3,27
	Ortalama RSSI	-61,4	-63,5	-70,1	-71,8	-82	-79,8	-81	2,26

kullanıldığında yol kaybı katsayısını tanımlamak gerçekten zor bir konu olur. Bu durumda aynı noktada daha fazla örnek ile bu değerin belirlenmesi gerekmektedir. Bu örnekte 10 ölçüm ile yol kaybı katsayısı belirlenmiş oldu. Her ölçüm alındığında farklı RSSI değerlerinin üretilmesinin sebebi, çoklu yol yayılımı (multipath) etkisi ve yayın için kullanılan 3 farklı frekansın alıcıda farklı zamanlarda indüklenmesidir.

Ortamın standart sapması her bir örnekleme için değil ortalama değer için oluşturulur. Yol kaybı katsayısı Tablo 4.3’teki ortalama RSSI değerleri ile 2.26 olarak hesaplanmıştır. Standart sapma değerini belirlemek için yol kaybı katsayısı $n = 2.26$ değeri ve Tablo 4.3’teki ortalama RSSI satırındaki değerler kullanılır. Bu değerler ile Bölüm 2.5.2.2’deki işlemler uygulandığında standart sapma değeri 2.95 olarak bulunur. Nihai formül aşağıdaki gibi olur:

$$P_r(d)_{dBm} = P_r(d_0)_{dBm} - 22,6 \cdot \log \left[\frac{d}{d_0} \right] - 2,95 \quad (4.1)$$

Bu bağlamda Şekil 3.2’deki kırmızı yıldızla belirtilen konumda alınan ölçümler Tablo 4.1’e konulmuştur. Bu ölçümler neticesinde oluşturulan Denklem 4.1 mesafe hesaplamasında kullanılır. Denklem 4.1 ile tracker ve anchorlar arasındaki mesafe:

$$P_{r-A1}(d)_{dBm} = -61,4 - 22,6 \log \left[\frac{d}{1} \right] - 2,95 \rightarrow d_{r-A1} = 10^{\frac{-64,35 - P_{r-A1}(d)_{dBm}}{22,6}} ;$$

- $d_{r-A1} = 10^{\frac{-64,35-(-82)}{22,6}} = 6,03 \text{ m}$
- $d_{r-A2} = 10^{\frac{-64,35-(-79)}{22,6}} = 4,44 \text{ m}$
- $d_{r-A3} = 10^{\frac{-64,35-(-70)}{22,6}} = 1,77 \text{ m}$
- $d_{r-A4} = 10^{\frac{-64,35-(-80)}{22,6}} = 4,92 \text{ m}$ olmaktadır.

Standart sapma değeri kullanılmadan (gölgeleme etkisi olmadan):

$$P_{r-A1}(d)_{dBm} = -61,4 - 22,6 \log \left[\frac{d}{1} \right] \rightarrow d_{r-A1} = 10^{\frac{-61,4 - P_{r-A1}(d)_{dBm}}{22,6}} ;$$

- $d_{r-A1} = 10^{\frac{-61,4-(-82)}{22,6}} = 8,15 \text{ m}$
- $d_{r-A2} = 10^{\frac{-61,4-(-79)}{22,6}} = 6,00 \text{ m}$
- $d_{r-A3} = 10^{\frac{-61,4-(-70)}{22,6}} = 2,40 \text{ m}$
- $d_{r-A4} = 10^{\frac{-61,4-(-80)}{22,6}} = 6,65 \text{ m}$

olarak tracker ile 4 anchor arasındaki standart sapmanın hesaba katıldığı ve katılmadığı durumlar için mesafe bulunmuş olur. Konum tespiti için standart sapmanın eklenmiş (gölgelemenin olduğu durum) halini mi yoksa eklenmemiş halini mi kullanmamız gerekecektir? Bunun cevabını şu şekilde verebiliriz: O noktada (kırmızı yıldızlı nokta) alınan 10 ölçüm vardır. Her bir anchor'dan bu ölçümlerin sonuçlarına göre, yani o ölçümlerin kendi içindeki standart sapma değeri hesaplanırsa ve hesaplanan standart sapma değeri sıfıra yakın ise (LOS durumu yüksek, gölgeleme olmayan durum) standart sapmasız formül, eğer sıfırdan büyük ve formüldeki standart sapmaya yakın ve ondan büyük ise standart sapma eklenmiş formül kullanılmalıdır. Bu örnek özelinde bu haliyle tekrar incelenirse Tablo 4.1'deki ölçümlerin kendi içindeki standart sapması Tablo 4.4'te verilmiştir.

Tablo 4.4'e bakıldığında standart sapmalar ortamın standart sapmasının (2.95) üzerinde olduğundan bütün anchor-tracker mesafe hesaplamalarında Denklem 4.1'in kullanılması konumlandırma için daha uygun olur. Örneğin, tracker-A2 anchorı arasındaki standart sapma değeri 2,95'ten çok küçük ve sıfıra yakın olsa, Denklem 4.1'deki standart sapma değerini kaldırıp mesafe hesaplaması yapabilir ki, bu durum konum hassasiyetimizi artırabilir.

Tablo 4.4: Şekil 3.2’deki ortamın her bir anchor için kendi içinde standart sapması.

zaman		A1(anchor)	A2(anchor)	A3(anchor)	A4(anchor)	
100. ms	tracker	-76	-80	-69	-76	dBm
200. ms	tracker	-75	-84	-	-79	dBm
300. ms	tracker	-78	-73	-73	-83	dBm
400. ms	tracker	-79	-	-66	-90	dBm
500. ms	tracker	-90	-81	-65	-71	dBm
600. ms	tracker	-92	-83	-77	-78	dBm
700. ms	tracker	-79	-88	-75	-86	dBm
800. ms	tracker	-79	-74	-	-77	dBm
900. ms	tracker	-85	-76	-66	-80	dBm
1000. ms	tracker	-87	-72	-69	-80	dBm
	Ortalama RSSI	-82	-79	-70	-80	dBm
	Standart Sapma	6,01	5,54	4,50	5,33	dBm

Şu anda elde tracker-anchor arası mesafenin bulunmasını sağlayan Denklem 4.2 ile hesaplanan 4 adet mesafe bilgisi bulunmaktadır. Bu mesafeler Tablo 4.5’te düzenli bir şekilde verilmiştir.

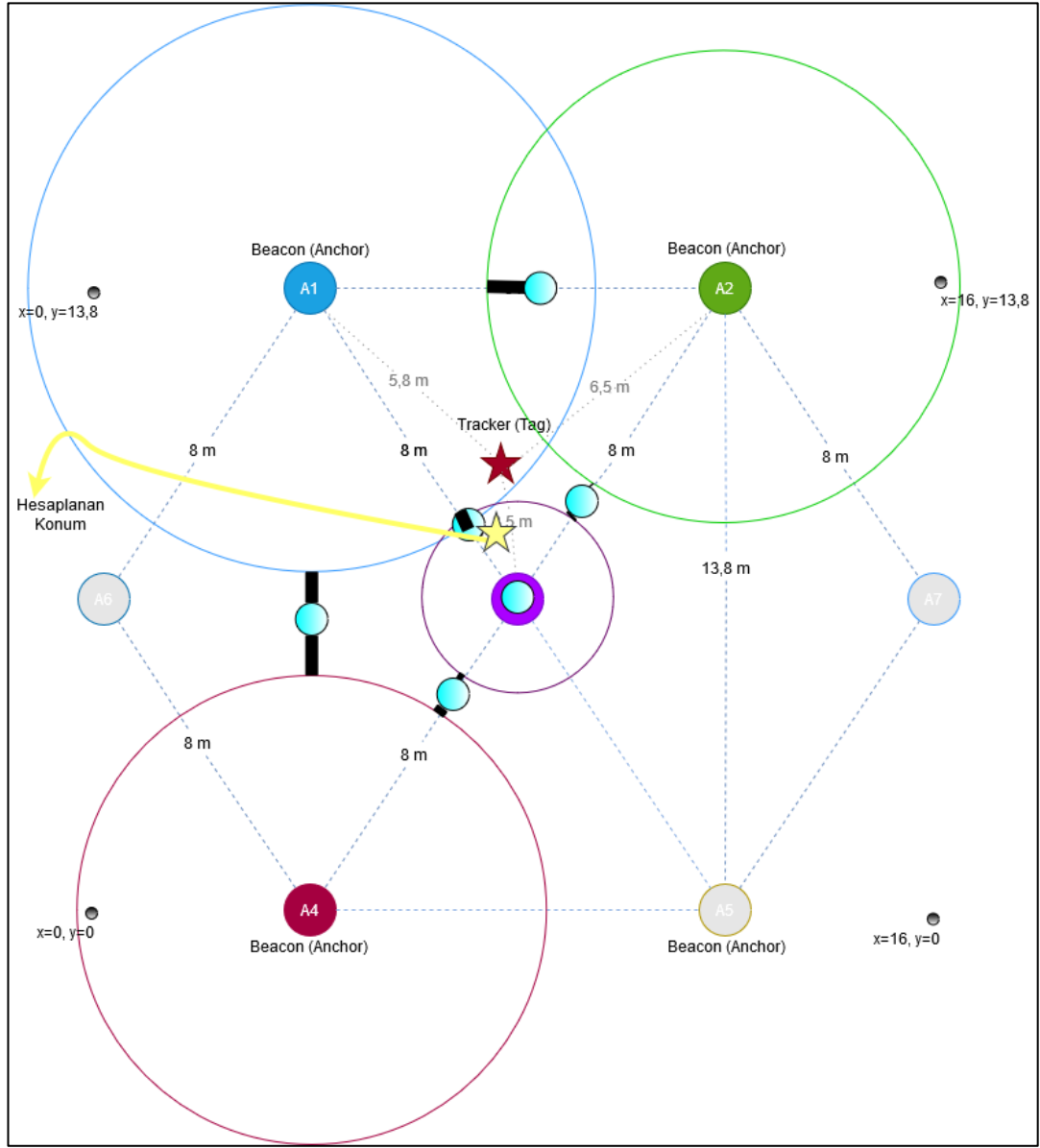
Tablo 4.5: Şekil 3.2’deki Tracker-Anchor arası mesafe bilgisi.

		A1(anchor)	A2(anchor)	A3(anchor)	A4(anchor)	
tracker	Ortalama RSSI	-82	-79	-70	-80	dBm
tracker	Mesafe (m)	6,03	4,44	1,77	4,92	m

Bu hesaplar neticesinde cihazın kat planı üzerindeki gerçek konumu $x = 7.8$ m, $y = 10.2$ m olan trackerın (kırmızı yıldızlı nokta) klasik üçgenleme metodu ile konum tespiti yapıldığında (Şekil 4.2’de gösterilmiştir) hesaplanan konumunun (sarı yıldızlı nokta) $x = 7.3$ m, $y = 8,3$ m olarak çıktığı görülmüştür. Buradaki hata miktarı (sapma değeri) $\sqrt{(7.8 - 7,3)^2 + (10.2 - 8,3)^2} = 1,96$ m’dir.

Burada yol kaybı katsayısı belirlenmeden yapılan konumlandırma ile yol kaybı katsayısı belirlendikten sonra yapılan konumlandırma arasında ufak bir fark var gibi gözükür. Yol kaybı katsayısı her ortam için sabit, değeri 3 olarak kabul edilen ve yol kaybı katsayısı sabit olmayan, ortam için belirlenen ($n = 2,26$) iki sistemin konumlandırmadaki hata miktarları sırasıyla 2.46 m ve 1.96 m olarak hesaplanmıştır.

Ayrıca tracker-anchor arasındaki hesaplanan mesafelerin iki farklı yöntem ile sonuçları tek tek Tablo 4.6’da gösterilmiştir.



Şekil 4.2: Klasik üçgenleme ile konum tespiti (Denklemler 4.1 ile).

Farklı ortamlarda; örneğin ortamın gerçek yol kaybı katsayısı $n = 4,2$ olan ortamlarda sabit olarak kullanılan $n = 3$ değerli hesaplama ile sahada ölçülüp hesaplanan $n = 4,2$ değeri arasındaki fark konumlandırmaya da yansır ve büyük farklılıklar meydana gelir. Konumlandırmayı biraz daha iyileştirecek olan tek frekanstan yayın yapma ve bu frekansa göre yayın toplayıp ortamın yol kaybı katsayısının ve standart sapmasının bulunması, akabinde filtreli üçgenleme ve ağırlıklandırma metodu kullanılması daha tutarlı ve daha güvenilir bir konuma gelmesini sağlar.

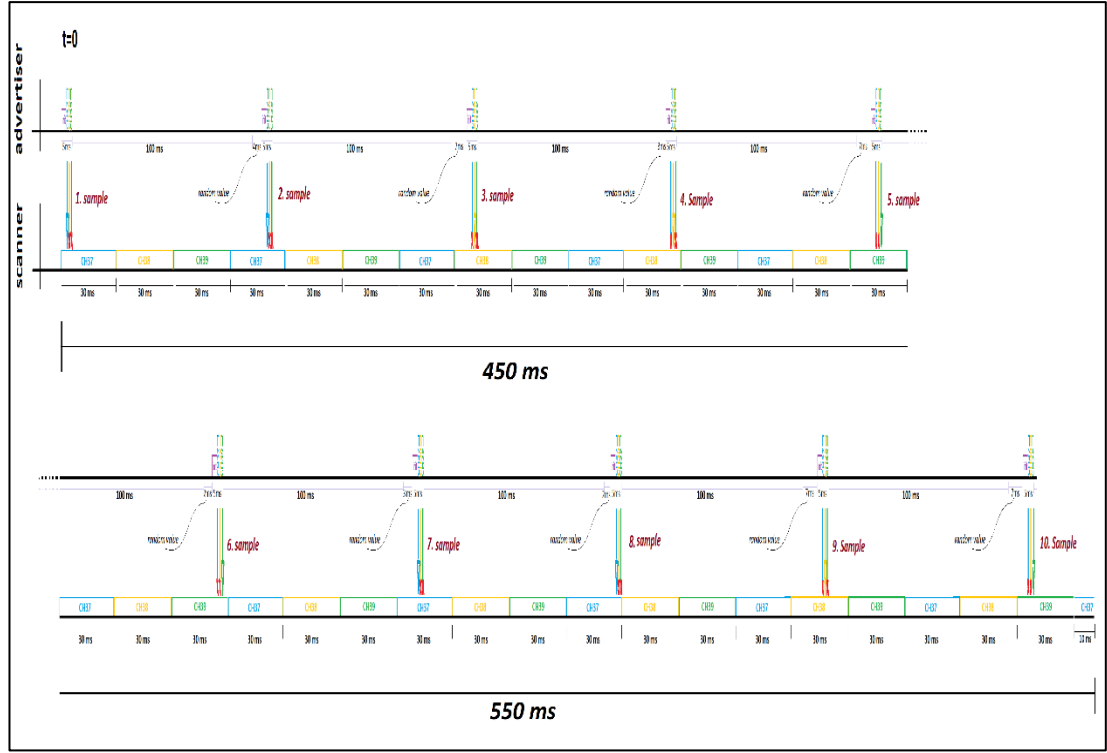
Tablo 4.6: Şekil 3.2’deki Tracker-Anchor arası mesafe bilgisi.

			Tracker - A1(anchor)	Tracker- A2(anchor)	Tracker- A3(anchor)	Tracker- A4(anchor)	
		Gerçek mesafe	5,8	6,5	2,5	10,1	m
		Ortalama RSSI (Tablo 4.1)	-82	-79	-70	-80	dBm
Mesafe bulmak için	n=3(sabit), standart sapma yok	Mesafe (m)	5,41	4,29	2,15	4,61	m
Kullanılan yöntem	LNSM,n=2.26, standart sapma =2,95	Mesafe (m)	6,03	4,44	1,77	4,92	m

4.3. Tek Frekanstan Yapılan Yayın ve LNSM ile Konumlandırmanın Yapılması

Bilindiği üzere BLE sisteminde 3 farklı yayın frekansı bulunmaktadır. Bunlar 2402 MHz (CH37), 2426 MHz (CH38), 2480 MHz (CH39) frekanslarıdır (Şekil 2.9’da da gösterilmiştir). Ayrıca Şekil 2.10 incelendiğinde bu 3 frekanstan yapılan yayınların en güçlüsü (en yüksek güçle iletme çıkan işaret) 2426 MHz de olan 38. kanaldır. En zayıfı da 37. kanaldır. Örneğin, Tablo 4.1’deki A1 anchorından gönderilen işaretlerin alıcıda indüklenmesi sonucu ortaya çıkan 10 adet RSSI bilgisi birbirinden çok farklı olabilmektedir. Sırasıyla bakıldığında **-76** dBm , **-75** dBm, -78 dBm, -79 dBm, **-90** dBm, -92 dBm, -79 dBm, **-79** dBm, **-85** dBm, **-87** dBm’dir. Bu ölçümlerden bazıları 37. kanal, bazıları 38. kanal, bazıları da 39. kanalda olabilir; belki de hepsi tek bir kanal için denk gelmiş de olabilir. Şekil 4.3’te bu konu özetlenmiştir.

Şekil 4.3 incelendiğinde, 1. yayın (sample) alıcıda 37. kanal tarama penceresi etkin iken indüklenmiş, dolayısıyla karşıdan 3 frekanstan da gelen yayınlardan sadece 2402 MHz (CH37) olan yayın alıcıda kabul edilecektir. Bu şekilde bütün yayınların alıcıdaki karşılığı incelendiğinde sırasıyla alıcıda indüklenen yayın Şekil 4.3’e göre frekansları kanal cinsinden şu şekilde olur: CH37, CH37, CH38, CH38, CH39, CH39, CH37, CH37, CH38, CH39. Burada şöyle bir şey düşünülebilir; yayın yapma aralığı öyle ayarlansın ki, tüm yayınlar alıcıda aynı tarama penceresine denk gelsin. Bu durum mümkün değildir. Çünkü BLE standartlarında yayın yapılan aralık değerine her yayın sonrasında rastgele 0-10 ms arasında bir değer eklenir. Bu sebeple bu durumu denk getirmek mümkün değildir.



Şekil 4.3: 100ms’de bir 3 kanaldan yayın, alıcının 1sn dinlemede kalması.

Tablo 4.1’deki A1 anchorından çıkan yayınların trackerda (alıcıda) indüklenmesi sonucu ortaya çıkan 10 RSSI değerine bu gözle bakıldığında sırasıyla -76 dBm, -75 dBm, -78 dBm, -79 dBm, -90 dBm, -92 dBm, -79 dBm, -79 dBm, -85 dBm, -87 dBm’dir. İşaret güçlerinin sırasıyla CH37, CH37, CH38, CH38, CH39, CH39, CH37, CH37, CH38, CH39 gibi bu kanallarda indüklenmiş olması mümkün bir durum gibi gözükür. Bu durum Tablo 4.7’de gösterilmiştir.

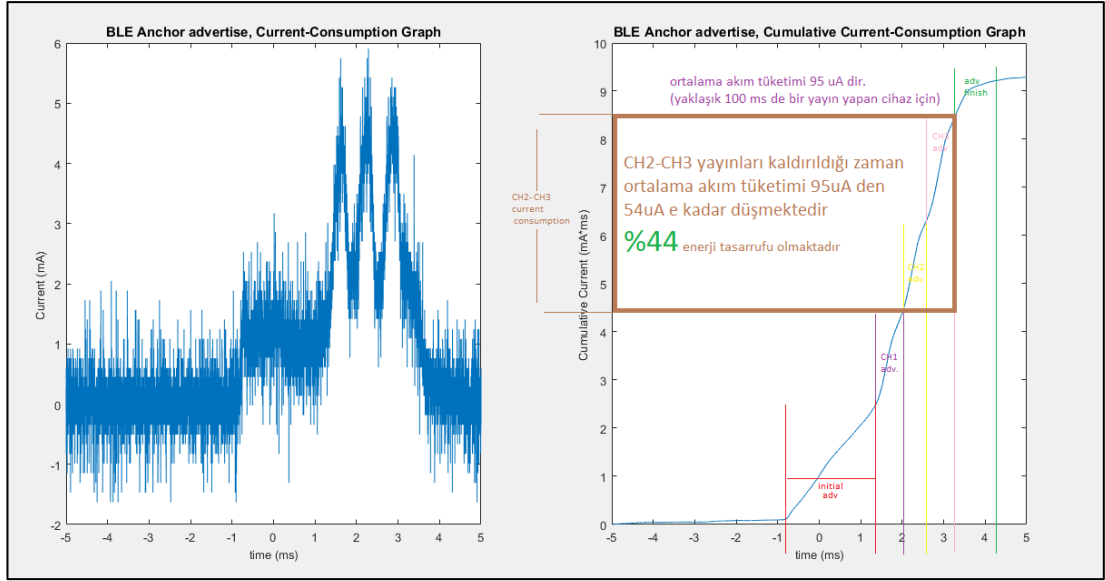
Tablo 4.7: Alınan yayın-kanal ilişkisi.

zaman		A1(anchor)	Trackerdaki SCAN window
100. ms	tracker	-76	CH37- 2402MHz
200. ms	tracker	-75	CH37- 2402MHz
300. ms	tracker	-78	CH38- 2426MHz
400. ms	tracker	-79	CH38- 2426MHz
500. ms	tracker	-90	CH39- 2480MHz
600. ms	tracker	-92	CH39- 2480MHz
700. ms	tracker	-79	CH37- 2402MHz
800. ms	tracker	-79	CH37- 2402MHz
900. ms	tracker	-85	CH38- 2426MHz
1000. ms	tracker	-87	CH39- 2480MHz

Buradan çıkarılacak olan sonuç şudur: CH37 ve CH38’de yayın kalitesi daha iyi (Şekil 2.10’da da bunu destekleyen durum mevcut), CH 39 daha kötüdür. Bu durumda alınan işaretin çok farklı güçlerde (RSSI) olmasının bir diğer sebebi de ortaya çıkmış olur. O halde ne yapılması gerekir? Tek bir frekans (örneğin 2426 MHz-CH38) için yayın yapılması sağlanabilirse, en azından alınan işaretin hangi frekansa ait olduğu bilinir ve alınan işarettaki tutarsızlık sorunu ortadan kalkmış olur, hatta alınan işaretlerin Tablo 4.4’deki gibi standart sapma değerlerinin çok düşük seviyelere çekilmesi sağlanmış olur. Örneğin, yayın yapıcı taraf 100 ms yayın aralığı ile sadece kanal 38’den yayın yaptığında 1 sn içinde 10 yayın yapabilir. Alıcı tarafın 3 kanalı da taradığı bilindiği durumda alıcıda bu yayınların kaç tanesini indüklenebilir? Bu örnek için Şekil 4.3 incelendiğinde 1. örnek, 2. örnek, 5. örnek, 6. örnek, 7. örnek, 8. örnek ve 10. örnek alıcı tarafta karşılanamaz. Çünkü o anda alıcı tarafının tarama penceresi farklı bir frekans için açılmıştır. Sadece alıcı tarafta 3. örnek 4. örnek ve 9. örneğin karşılığı olabilir. Yani 10 örnek yerine 3 örnek alınır. Eğer daha fazla örnek alınması istenirse, BLE standartlarının izin verdiği en az 20’ms de bir yayın yapıp $100/20 * 3 = 15$ adet yayın alınması (1sn içerisinde) mümkün hale gelebilir.

Ancak hâlihazırda kullanılan sistemden güç tüketimi (pil tüketimi) konusunda taviz verilmesi istenmediğinde ise şu yola başvurulabilir: 3 frekanstan yayın yapıldığında toplam akım tüketimi ortalama 95 μA olurken tek bir frekanstan yapılan yayında ortalama 54 μA ’lık bir akım tüketimi olur. Bu durum cihaz 100 ms’de bir yayın yaparsa gerçekleşir. Şekil 4.4’te gösterildiği gibi 3 frekans yayını tek frekans yayınına indirince güç tüketimi açısından %44 lük bir avantaj sağlanıyor. O zaman tek kanala indirdiğimizde elde ettiğimiz bu avantajı tek kanaldan yapılan yayın sıklığını 2 katına çıkararak, yani 100 ms de bir yayın değil de 50 ms de bir yayın olarak kullanabiliriz. Bu halde tek frekanstan yapılan 1 sn içerisinde ($1sn/50ms = 20$) 20 adet yayının alıcı tarafta en az 6 tanesini karşılayabilen bir yapı meydana gelir ki bu durumda alıcıda 6 adet RSSI oluşması anlamına gelir.

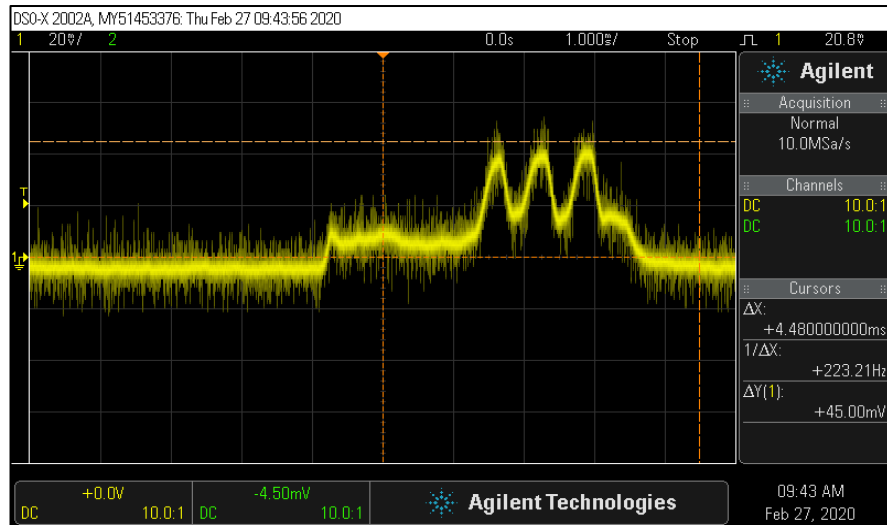
Şekil 4.4’te yayın yapan bir cihazın osiloskop kaydının (Şekil 4.6) çıktısı alınıp csv halinde MATLAB üzerinde hem osiloskop kaydı hemde birikimli akım tüketimi gösterilmektedir. Şekil 4.5’te de 3 frekans yayının tek frekansa indirilmiş hali mevcuttur.



Şekil 4.4: 3 frekanstan yapılan yayının kümülatif akım tüketim grafiği.



Şekil 4.5: Tek frekans yayının osiloskop görüntüsü.



Şekil 4.6: 3 frekans yayının osiloskop görüntüsü.

Alınan işaret gücünün ne denli yayın yapılan frekansa bağlı olduğunu gördükten sonra (bu durumun oluşmasının sebebi Şekil 2.9’da mevcuttur) konumlandırmada kullanılan RSSI değerini etkileyen bu durumdan kurtulmak için, tek bir frekanstan yayın yapılması gerekir. Bu şekilde hazırlanan (tek bir frekans için yayın, 2426 merkez frekanslı yayın seçildi) cihaz 50 ms’de bir yayın ile 20 adet yayın çıkarır ve alıcıda alınan işaretler Tablo 4.8’de verilmiştir.

Tablo 4.8: Şekil 3.2’deki işaretli noktada toplanan RSSI değerleri (tek frekanstan yapılan yayından toplanan).

zaman		A1(anchor)	A2(anchor)	A3(anchor)	A4(anchor)	
50. ms	tracker	-76	-	-	-79	dBm
100. ms	tracker	-	-74	-	-	dBm
150. ms	tracker	-	-	-71	-	dBm
200. ms	tracker	-	-	-	-76	dBm
250. ms	tracker	-	-78	-	-	dBm
300. ms	tracker	-78	-	-68	-	dBm
350. ms	tracker	-	-	-	-	dBm
400. ms	tracker	-	-80	-65	-79	dBm
450. ms	tracker	-	-	-	-	dBm
500. ms	tracker	-	-77	-	-	dBm
550. ms	tracker	-75	-	-	-	dBm
600. ms	tracker	-	-	-	-81	dBm
650. ms	tracker	-	-	-72	-	dBm
700. ms	tracker	-77	-79	-	-	dBm
750. ms	tracker	-	-	-	-82	dBm
800. ms	tracker	-79	-	-	-	dBm
850. ms	tracker	-	-75	-67	-81	dBm
900. ms	tracker	-	-	-	-	dBm
950. ms	tracker	-74	-	-	-	dBm
1000. ms	tracker	-	-	-	-78	dBm
	Ortalama RSSI	-76,50	-77,17	-68,60	-79,43	dBm

Tablo 4.8’de gösterilen, kırmızı yıldızlı noktada (Şekil 3.2’de) alınan bu işaret güçleri ile konum tespiti yapılması gerekmektedir. Öncelikle artık yayın yapan cihazın karakteristiği değiştiği için sahadan bu karakteristiğe göre tekrar referans ölçümler alınıp yol kaybı katsayısının hesaplanması, akabinde sahadaki standart sapma değerinin bulunması ile mesafe hesaplama için kullanacağımız LNSM denkleminde bilinmeyen değerleri koymamız gerekmektedir. Yine bir önceki modellerde yapıldığı

gibi, A1 anchorı ile tracker arasında 1 m’den 6 m’ye kadar referans ölçümleri alınıştır ve referans noktalarındaki ölçümler için 1 sn tarama yapıp alınan RSSI değerlerinin ortalaması Tablo 4.9’da gösterilmiştir.

Tablo 4.9: Şekil 3.2’deki tracker ve A1 anchorı (tek kanaldan yayın) arasındaki bazı mesafelerdeki ölçümler.

zaman		1 m	2 m	3 m	4 m	5 m	6 m	7 m
50. ms	tracker-A1(anchor)	-65	-	-	-73	-77	-	-85
100. ms	tracker-A1(anchor)	-	-64	-	-	-	-	-
150. ms	tracker-A1(anchor)	-	-	-71	-	-	-	-
200. ms	tracker-A1(anchor)	-	-	-	-72	-	-80	-
250. ms	tracker-A1(anchor)	-	-67	-	-	-75	-	-83
300. ms	tracker-A1(anchor)	-61	-	-68	-	-	-	-
350. ms	tracker-A1(anchor)	-	-	-	-	-	-	-
400. ms	tracker-A1(anchor)	-	-63	-65	-74	-	-81	-79
450. ms	tracker-A1(anchor)	-	-	-	-	-76	-	-
500. ms	tracker-A1(anchor)	-	-64	-	-	-	-	-
550. ms	tracker-A1(anchor)	-61	-	-	-	-74	-	-77
600. ms	tracker-A1(anchor)	-	-	-	-73	-	-76	-
650. ms	tracker-A1(anchor)	-	-	-70	-	-	-	-
700. ms	tracker-A1(anchor)	-59	-63	-	-	-77	-	-79
750. ms	tracker-A1(anchor)	-	-	-	-77	-	-79	-
800. ms	tracker-A1(anchor)	-58	-	-	-	-	-	-
850. ms	tracker-A1(anchor)	-	-66	-70	-75	-79	-	-88
900. ms	tracker-A1(anchor)	-	-	-	-	-	-83	-
950. ms	tracker-A1(anchor)	-60	-	-	-	-	-	-
1000. ms	tracker-A1(anchor)	-	-	-	-72	-76	-	-85
	Ortalama RSSI	-60,7	-64,5	-68,8	-73,7	-76,3	-79,8	-82,3

Bölüm 2.5.1.1’de detaylı olarak belirtilen MMSE yöntemi kullanılarak Tablo 4.9’daki ortalama RSSI değerleri için yol kaybı katsayısı hesaplanır. Tracker-anchor arasındaki 1 m, 2 m, 3 m, 4 m, 5 m, 6 m, 7 m’de alınan işaretler ile hesaplanan yol kaybı katsayısı 2.29 çıkar ve Tablo 4.10’da gösterilmiştir. Bu örnek için referans değer 1 m’de -60.7 dBm’dir. Standart sapma değerini belirlemek için yol kaybı katsayısı $n = 2.29$ değeri ve Tablo 4.9’daki ortalama RSSI satırındaki değerler kullanılır. Bu değerler ile Bölüm 2.5.2.2’deki işlemler uygulandığında standart sapma değeri 1.89 olarak bulunur.

Tablo 4.10:Şekil 3.2’deki ortamın (tek freakanstan yayın yapan anchorlar) yol kaybı katsayısı.

		1 m	2 m	3 m	4 m	5 m	6 m	7 m	Yol kaybı katsayısı (n)
tracker- A1(anchor)	Ortalama RSSI	-60,7	-64,5	-68,8	-73,7	-76,3	-79,8	-82,3	2,29

Yol kaybı katsayısı ve standart sapma değeri bulunduğundan sonra nihai formül aşağıdaki gibi olur:

$$P_r(d)_{dBm} = P_r(d_0)_{dBm} - 22,9 \cdot \log \left[\frac{d}{d_0} \right] - 1,89 \quad (4.2)$$

Bu bağlamda Şekil 3.2’deki kırmızı yıldızla belirtilen konumda alınan ölçümler Tablo 4.8’e konulmuştur. Bu ölçümler neticesinde oluşturulan Denklem 4.2 mesafe hesaplamasında kullanılır. Standart sapma değerinin eklendiği durumda, yani Denklem 4.1 ile tracker ve anchorlar arasındaki mesafe:

$$P_{r-A1}(d)_{dBm} = -60,7 - 22,9 \log \left[\frac{d}{1} \right] - 1,89 \rightarrow d_{r-A1} = 10^{\frac{-62,59 - P_{r-A1}(d)_{dBm}}{22,9}};$$

- $d_{r-A1} = 10^{\frac{-62,59 - (-76,5)}{22,9}} = 4,05 \text{ m}$
- $d_{r-A2} = 10^{\frac{-62,59 - (-77,17)}{22,9}} = 4,33 \text{ m}$
- $d_{r-A3} = 10^{\frac{-62,59 - (-68,6)}{22,9}} = 1,82 \text{ m}$
- $d_{r-A4} = 10^{\frac{-62,59 - (-79,43)}{22,9}} = 5,43 \text{ m}$ olarak hesaplanmaktadır.

Standart sapma değeri kullanılmadan (gölgeleme etkisi olmadan);

$$P_{r-A1}(d)_{dBm} = -60,7 - 22,9 \log \left[\frac{d}{1} \right] \rightarrow d_{r-A1} = 10^{\frac{-60,7 - P_{r-A1}(d)_{dBm}}{22,9}};$$

- $d_{r-A1} = 10^{\frac{-60,7 - (-76,5)}{22,9}} = 4,89 \text{ m}$
- $d_{r-A2} = 10^{\frac{-60,7 - (-77,17)}{22,9}} = 5,23 \text{ m}$
- $d_{r-A3} = 10^{\frac{-60,7 - (-68,6)}{22,9}} = 2,21 \text{ m}$

- $d_{r-A4} = 10^{\frac{-60,7 - (-79,43)}{22,9}} = 6,57 \text{ m}$

olarak tracker ile 4 anchor arasındaki standart sapmanın hesaba katıldığı ve katılmadığı durumlar için mesafe bulunmuş olur. Konum tespiti için standart sapmanın eklenmiş (gölgelemenin olduğu durum) halini mi yoksa eklenmemiş halini mi kullanmamız gerekecektir? Bunun cevabını şu şekilde verebiliriz: O noktada (kırmızı yıldızlı nokta) alınan 10 ölçüm vardır. Her bir anchor'dan, bu ölçümlerin sonuçlarına göre yani o ölçümlerin kendi içindeki standart sapma değeri hesaplanır ve hesaplanan standart sapma değeri sıfıra yakın ise (LOS durumu yüksek, gölgeleme olmayan durum) standart sapmasız formül, eğer sıfırdan büyük ve formüldeki standart sapmaya yakın ve ondan büyük ise, standart sapma eklenmiş formül kullanılmalıdır. Bu örnek özelinde bu haliyle tekrar incelenirse Tablo 4.8'deki ölçümlerin kendi içindeki standart sapması Tablo 4.11'da verilmiştir.

Tablo 4.11: Şekil 3.2'deki ortamın her bir anchor (tek frekanstan yayın) için kendi içinde standart sapması.

zaman		A1(anchor)	A2(anchor)	A3(anchor)	A4(anchor)	
50. ms	tracker	-76			-79	dBm
100. ms	tracker		-74			dBm
150. ms	tracker			-71		dBm
200. ms	tracker				-76	dBm
250. ms	tracker		-78			dBm
300. ms	tracker	-78		-68		dBm
350. ms	tracker					dBm
400. ms	tracker		-80	-65	-79	dBm
450. ms	tracker					dBm
500. ms	tracker		-77			dBm
550. ms	tracker	-75				dBm
600. ms	tracker				-81	dBm
650. ms	tracker			-72		dBm
700. ms	tracker	-77	-79			dBm
750. ms	tracker				-82	dBm
800. ms	tracker	-79				dBm
850. ms	tracker		-75	-67	-81	dBm
900. ms	tracker					dBm
950. ms	tracker	-74				dBm
1000. ms	tracker				-78	dBm

	Ortalama RSSI	-76,50	-77,17	-68,60	-79,43	dBm
	Standart Sapma	1,87	2,32	2,88	2,16	

3 frekanstan yayın yapan cihazlara göre alınan ölçümlerin yer aldığı Tablo 4.4 ile tek frekanstan yayın yapan cihazlara göre alınan ölçümler Tablo 4.11 kıyaslandığında bariz bir şekilde alınan örneklerin standart sapma değerlerinin Tablo 4.11’de daha düşük olduğu görülmektedir. Bunun nedeni yukarıda da açıklandığı gibi, anchorın tek bir frekanstan yayın yapmasıdır. O halde mesafe hesaplamada kullanılan LNSM formülündeki standart sapma değerinin 1.89 olması ve bu değer mesafe hesaplamada işin içine girmesinin veya girmemesini şu şart sağlar: Eğer Tablo 4.11’deki standart sapma değerleri Denklem 4.2’de yer alan standart sapma değerinden (1.89) küçük ise tracker-anchor arasındaki mesafe hesaplamasında küçük olan değer standart sapma değeri olarak kullanılması gerekir. Eğer büyük ise mesafe tracker anchor arası mesafe hesaplaması için Denklem 4.2 kullanılır. Çünkü, sahadan ilk etapta alınan ölçüme göre ortamın standart sapma değeri 1.89 olarak ölçülmüştür. Bu değeri (1.89) aşmak hatalı sonuçlar ürettirebilir. Bu yüzden, mesafe modeli Denklem 4.2’deki gibi kullanılır, eğer gerçek zamanlı konum tespiti yapıldığı anda, alınan ölçümlerin standart sapması (1 sn içinde 6 örnek) 1.89’dan büyük ise Denklem 4.2 ile devam edilir. Eğer değilse alınan ölçümlerin standart sapmasını denkleme yerleştirip mesafe hesaplamasını o şekilde yapmak daha uygun olur.

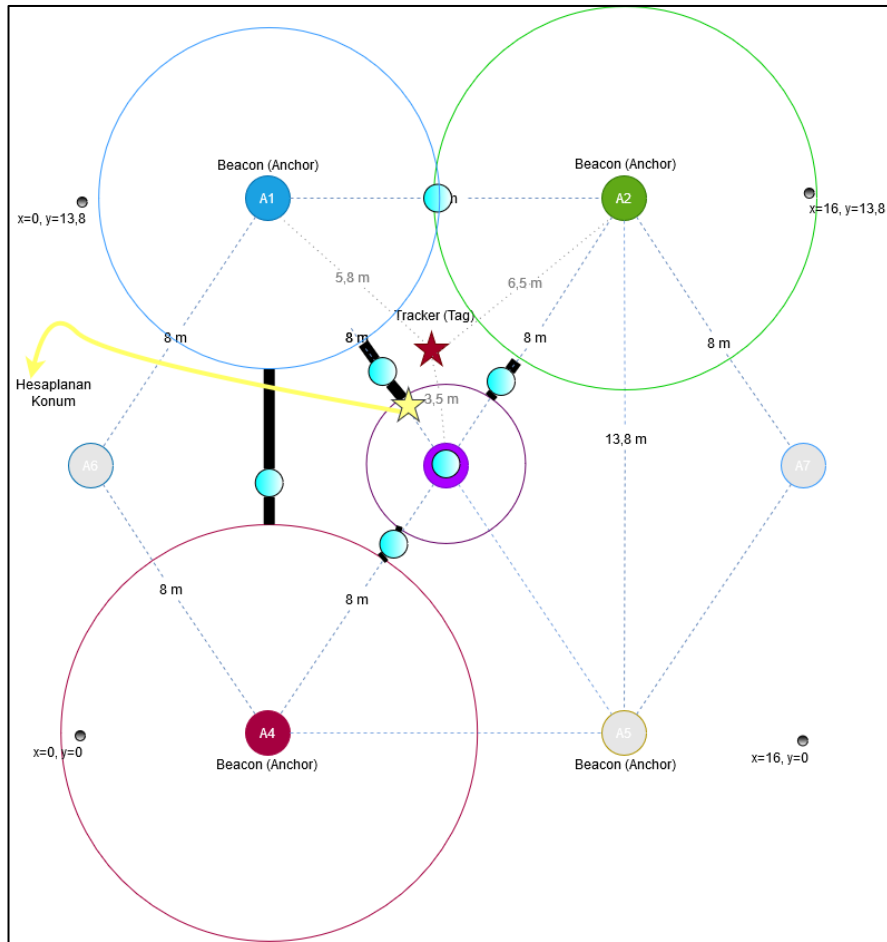
Tek bir noktada alınan işaretlerin standart sapması çok yüksek ise güvenilirliği azdır. Genellikle 3 frekanstan yapılan yayınlarda bu duruma rastlanır. Eğer bir noktada alınması gereken 10 ölçümün 3’ü alınmışsa (hangi frekanstan alındığı bilinmediğinde), ortalama değer yüksek veya düşük çıkabilir. Standart sapma değerleri bunu gösteriyor. Tablo 4.4’te A1 anchorından alınan işaret için standart sapma değeri 6.01’dir. 3 frekanstan yapılan yayınlarda ek olarak şu duruma da rastlanır: alıcıda 1. tarama periyonda (1 sn) alınan tüm yayınlar CH37’ye, ikinci taramada CH38’e veya CH39’a ait olabilir. Bunun gibi durumlar meydana gelebileceğinden; 3 frekans yayınının güvenilirliği sorgulanır. Bu yüzden tek kanal (freakans) yayınının kullanımında hem kendi içindeki standart sapmasının düşük olması hem de bu kanala göre çıkarılan yol kaybı katsayısı değeri ve ona binaen bulunan standart sapma değeri, bununla birlikte hesaplanan mesafe daha güvenilir sonuçlar üretecektir. Şu anda elde tracker-anchor arası mesafenin bulunmasını sağlayan Denklem 4.2 ile hesaplanan 4

adet mesafe bilgisi bulunmaktadır. Bu mesafeler Tablo 4.12’de düzenli bir şekilde verilmiştir.

Tablo 4.12: Şekil 3.2’deki Tracker-Anchor arası mesafe bilgisi-2.

		A1(anchor)	A2(anchor)	A3(anchor)	A4(anchor)	
tracker	Ortalama RSSI	-76,50	-77,17	-68,60	-79,43	dBm
tracker	Mesafe (m)	4,05	4,33	1,82	5,42	m

Bu hesaplar neticesinde cihazın kat planı üzerindeki gerçek konumu $x = 7.8$ m, $y = 10.2$ m olan trackerın (kırmızı yıldızlı nokta) klasik üçgenleme metodu ile konum tespiti yapıldığında (Şekil 4.7’de gösterilmiştir) hesaplanan konumunun (sarı yıldızlı nokta) $x = 7.0$ m, $y = 8.2$ m olarak çıktığı görülmüştür. Buradaki hata miktarı (sapma değeri) $\sqrt{(7.8 - 7,0)^2 + (10.2 - 8,2)^2} = 2,15$ m’dir.



Şekil 4.7: Klasik üçgenleme ile konum tespiti (Denklem 4.2 ile).

Burada (Bölüm 4.3'te) bulunan hata miktarının Bölüm 4.1 ve 4.2'de bulunan hata miktarlarıyla kıyaslaması yapılamaz. Çünkü anchor'dan 3 frekanstan yapılan yayın ile tracker'da Bölüm 4.1 ve 4.2'deki gibi alınan işaretler aynıdır. Bölüm 4.1 ve 4.2'nin kıyaslaması aynı tablolar üzerinden yol kaybı modellerini değiştirerek yapılmıştır. Bu bölümde alınan işaretler anchor'dan yapılan yayın tek bir frekanstan olduğu için Bölüm 4.1 ve 4.2'de kullanılan ölçümlerden farklıdır, kıyaslama olmaz.

4.4. Filtreli Üçgenleme ve Ağırlıklandırma Metodunun Bölüm 4.1, 4.2, 4.3'te Hesaplanan RSSI-mesafe Değerlerine Uygulanması ile Konumlandırmanın Yapılması

Bu aşamada 3 adım bulunur. Bölüm 3'te de detaylı olarak bu konu anlatılmıştır ve konumlandırmada fark yaratan kısımların başında gelir. 1. adım filtreye takılacak ölçümün belirlenmesi, 2. adım ağırlıklandırmanın yapılması, 3. adım ise üçgenleme ile konumlandırmanın sağlanmasıdır. Bölüm 4.1, 4.2 ve 4.3'te hesaplanan RSSI-mesafe değerleri Tablo 4.13'te verilmiştir.

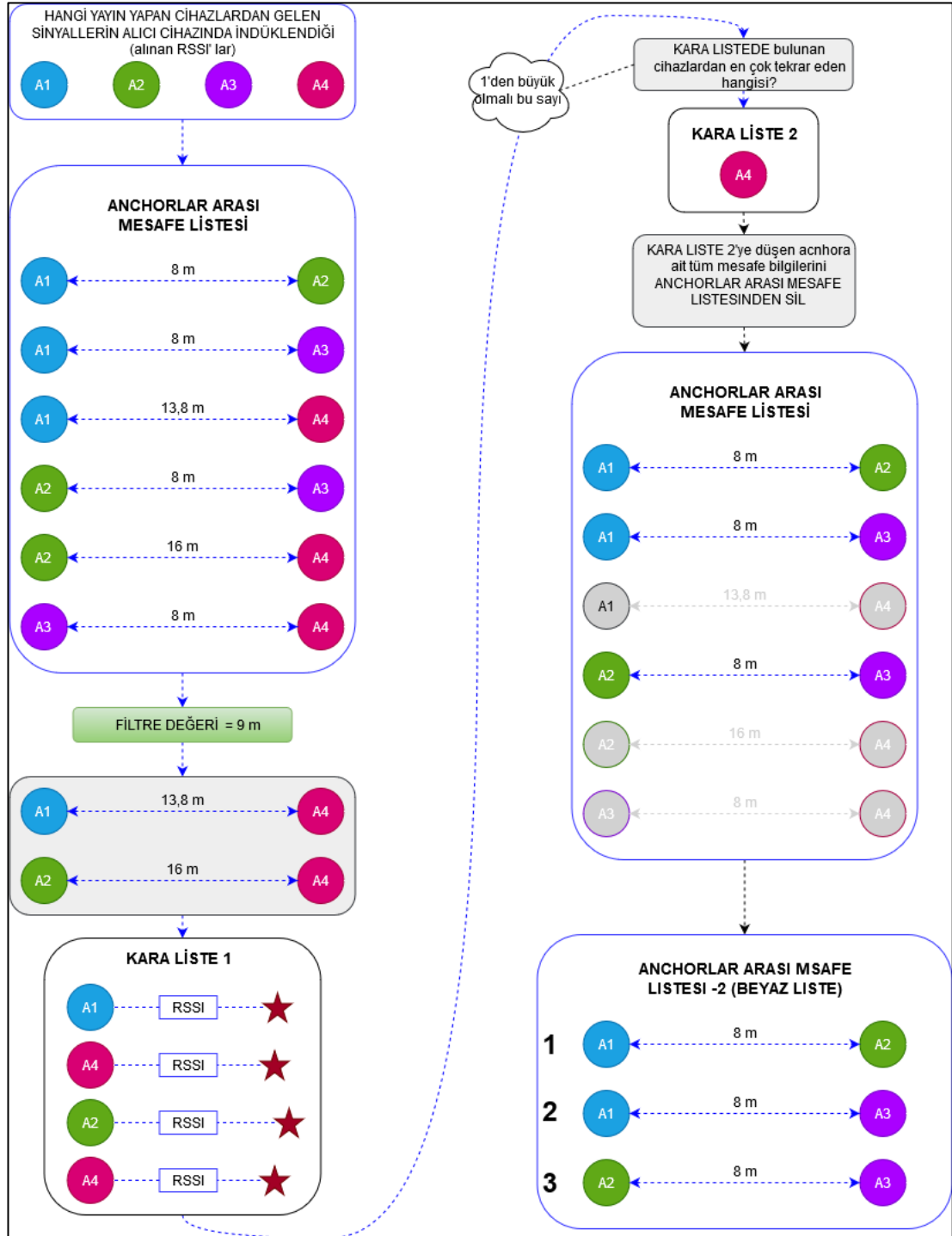
Tablo 4.13: Şekil 3.2'deki Tracker-Anchor arası mesafe bilgisi-3.

n=3(sabit), $X_{\sigma} \rightarrow$ yok		A1(anchor)	A2(anchor)	A3(anchor)	A4(anchor)	
tracker	Ortalama RSSI	-82	-79	-70	-80	dBm
tracker	Mesafe (m)	5,41	4,29	2,15	4,61	m
n=2.26, $X_{\sigma} \rightarrow 2.95$		A1(anchor)	A2(anchor)	A3(anchor)	A4(anchor)	
tracker	Ortalama RSSI	-82	-79	-70	-80	dBm
tracker	Mesafe (m)	6,03	4,44	1,77	4,92	m
n=2.29, $X_{\sigma} \rightarrow 1,89$		A1(anchor)	A2(anchor)	A3(anchor)	A4(anchor)	
tracker	Ortalama RSSI	-76,50	-77,17	-68,60	-79,43	dBm
tracker	Mesafe (m)	4,05	4,33	1,82	5,42	m

Adım adım konumlandırma için aşağıdaki aşamalar uygulanır:

- 1- Filtreye takılacak olan anchorın kenara alınması: Bu kat planı için filtre değeri 9 m olarak seçilmiştir. Detaylı bilgiler Bölüm 3.1'de anlatılmıştı. Aşağıda Şekil 4.8'de eleme işleminin nasıl yapıldığı gösterilmiştir. Şekil 4.8'den de anlaşılacağı üzere A4 cihazından alınan işaret gücü konum tespitinde hesaplamaya katılmayacaktır. Bu tekniğin amacı, trackerın etrafında (en yakınında) bulunan

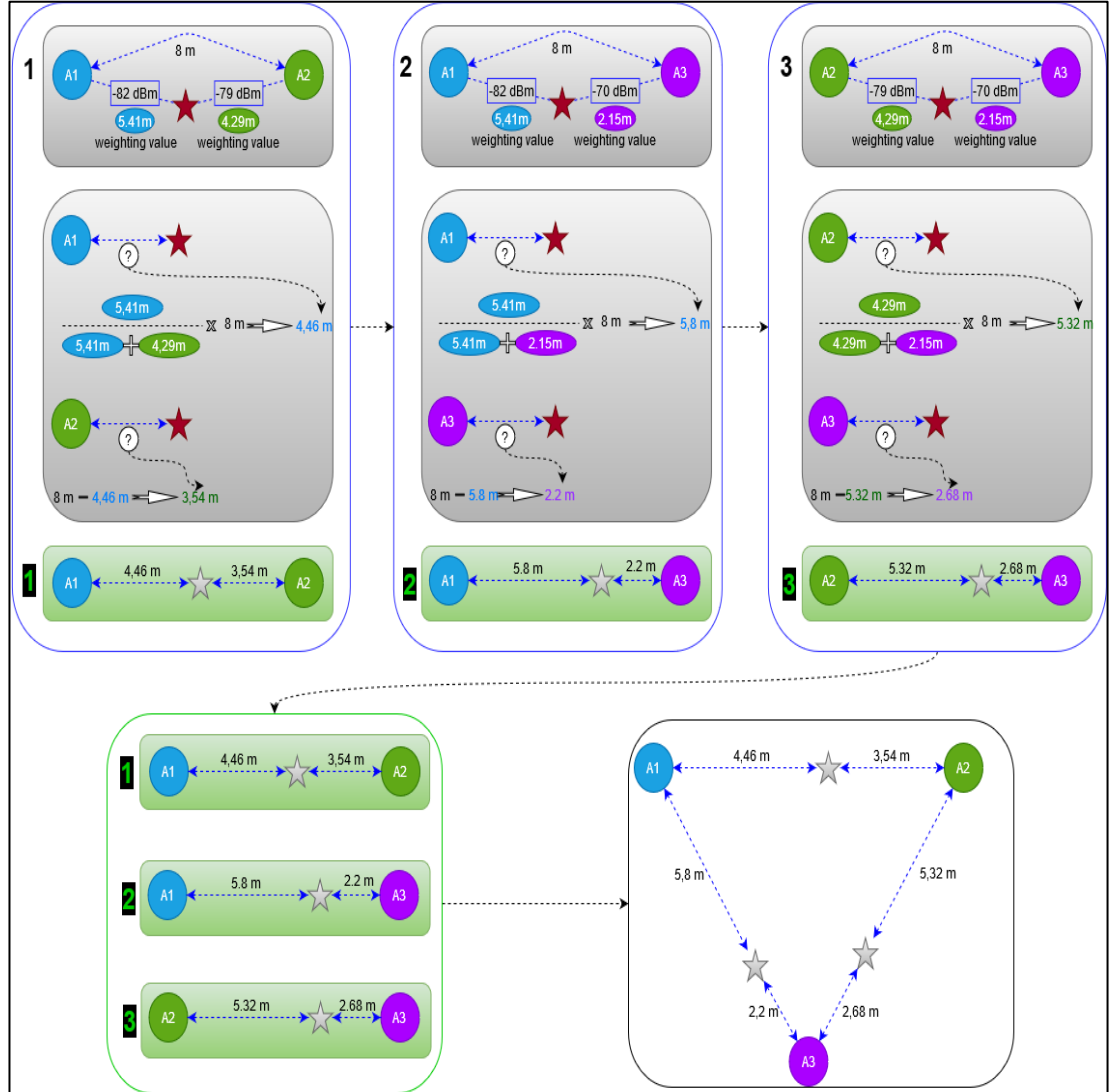
anchorlardan işaret alma olasılığının daha yüksek olduğu kanaatini (en güçlü işaretlerin bu anchorlardan alınması durumu) kullanmak ve uzak olabilecek anchorı eleyerek, konum hassasiyetini artırmaktır (uzak olan anchordan daha güçlü bir işaret bile gelse elenir). Burada kat planındaki anchorların konumlarının bilinmesinden faydalanılarak alınan işaret gücünden bağımsız bir şekilde hangi



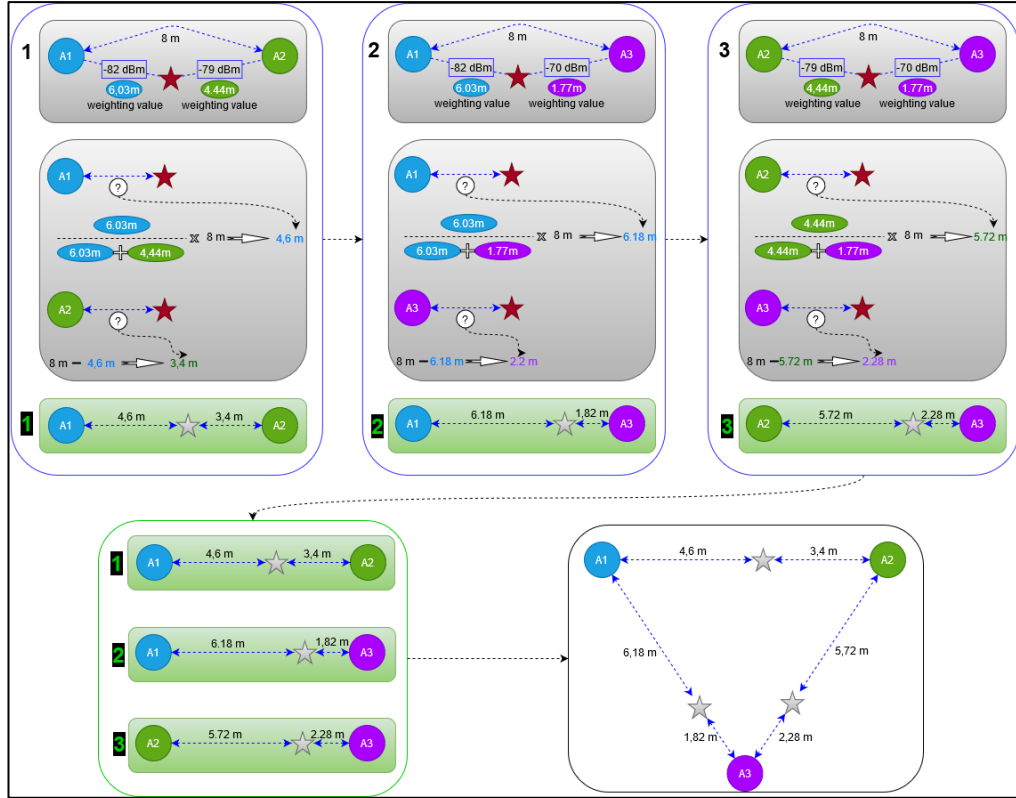
Şekil 4.8: Üçgenleme metodu için filtrelemenin yapılması.

cihazın daha uzak olduğu tespit edilebilir. Örneğin ortamda 10 adet anchor var, tracker bu anchorlardan 6 tanesinin işaretini indükledi ve RSSI oluşturdu. Alınan işaretlerin her bir anchor için ortalaması alınır ve bu 6 cihaz için güç sıralaması yapılır. Akabinde en güçlü 4 cihaz (yayın yapıcı cihaz) seçilir. Bu aşamadan sonra bu dört cihazın kat planına göre yerleşimine bakılır ve hangileri kümelenme (hangi cihazlar (anchorlar) birbirlerine daha yakın ise) halinde ise o anchorlar hesaplamaya dahil olur. EK A’da alandaki anchor konumlarının farklı yerleştirilmesi durumunda oluşacak filtreleme işinin nasıl yapıldığına dair daha detaylı bilgi aktarılmıştır.

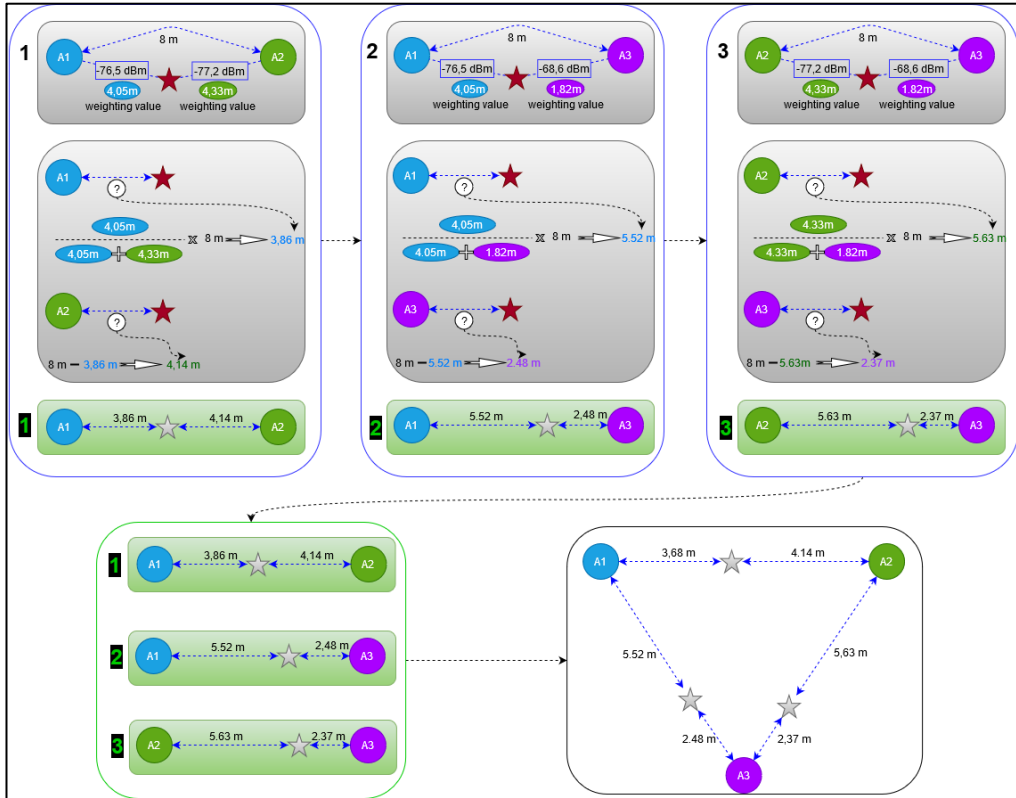
2- Ağırlıklandırmanın sağlanması: Elde kalan 3 anchor için Bölüm 3.2’de anlatılan ağırlıklandırma metodu izlenir. Tablo 4.13’teki 3 farklı model için ağırlıklandırma değerleri sırasıyla Şekil 4.9, Şekil 4.10 ve Şekil 4.11’de verilmiştir.



Şekil 4.9: Denklem 2.3’deki mesafe hesaplama yöntemi ile ağırlıklandırma yapılması.

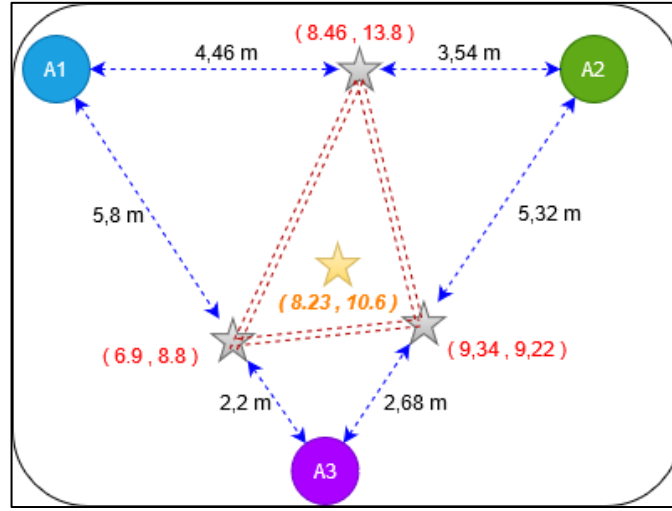


Şekil 4.10: Denklem 4.1'deki mesafe hesaplama yöntemi ile ağırlıklandırma yapılması.

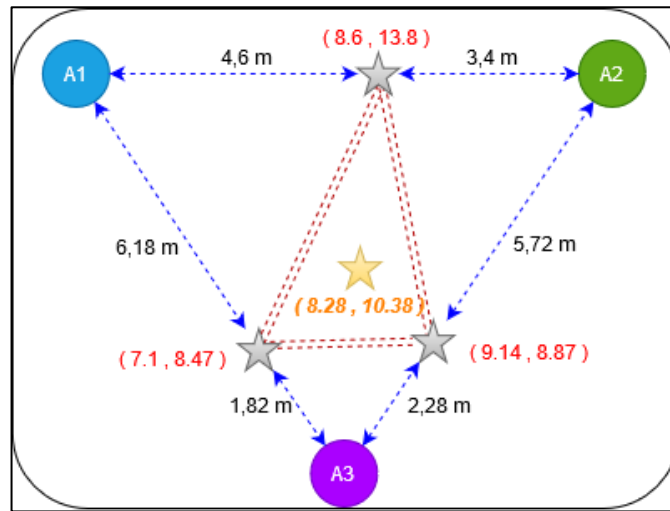


Şekil 4.11: Denklem 4.2'deki mesafe hesaplama yöntemi ile ağırlıklandırma yapılması.

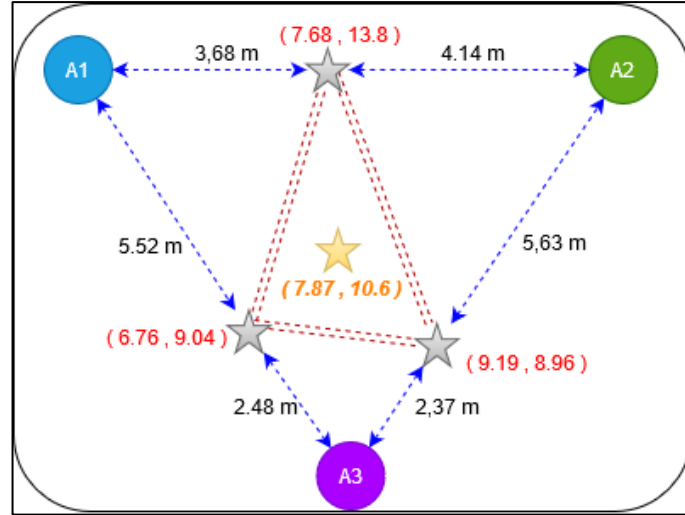
3- Üçgenleme ile konum tespiti: Gümüş yıldızlar ile ifade edilen 3 noktanın Şekil 3.2’deki kat planına göre koordinatları hesaplanıp Şekil 4.12, 4.13 ve 4.14’e kaydedilmiş ve 3 noktasının koordinatları bilinen üçgenin ağırlık merkezi Bölüm 3.3’de anlatıldığı gibi hesaplanır. Hesaplanan (konumu bulunan, tespit edilen trackerın) ağırlık merkezi sarı yıldız ile gösterilmiştir. Şekil 4.12’de $n = 3$ sabit yol kaybı katsayısı ile hesaplanan RSSI-mesafe modeli ile, Şekil 4.13’te $n = 2,26$ ve standart sapma 2.95 olan LNSM ile hesaplanan RSSI-mesafe modeli ile, son olarak Şekil 4.14’te tek frekans yayını ve $n = 2,29$ yol kaybı katsayısı, standart sapma 1.89 olan bir ortamda LNSM ile hesaplanan RSSI-mesafe modeli ile koordinatı gerçekte $x = 7.8$ m, $y = 10.2$ m’de olan trackerın koordinatları verilmiştir.



Şekil 4.12: Denklem 2.3’deki mesafe hesaplama yöntemi ile trackerın konum tespiti.



Şekil 4.13 : Denklem 4.1’deki mesafe hesaplama yöntemi ile trackerın konum tespiti.



Şekil 4.14: Denklem 4.2’deki mesafe hesaplama yöntemi ile trackerın konum tespiti.

3 farklı model için gerçek konum ile hesaplanan konum arasındaki hata payı Tablo 4.14’te gösterilmiştir.

Tablo 4.14: Filtreli üçgenleme ve ağırlıklandırma metodunun konum tespitine faydası.

n=3(sabit), $X_\sigma \rightarrow$ yok, Log-Distance		X	Y	MESAFE FARKI
tracker	GERÇEK KONUM	7.8 m	10.2 m	0,58 m
tracker	HESAPLANAN KONUM	8.23 m	10.6 m	
n=2.26, $X_\sigma \rightarrow$ 2.95, LNSM, CH37, CH38 ve CH39		X	Y	MESAFE FARKI
tracker	GERÇEK KONUM	7.8 m	10.2 m	0,51 m
tracker	HESAPLANAN KONUM	8.28 m	10.38 m	
n=2.29, $X_\sigma \rightarrow$ 1,89, LNSM, CH38		X	Y	MESAFE FARKI
tracker	GERÇEK KONUM	7.8 m	10.2 m	0,40 m
tracker	HESAPLANAN KONUM	7.87 m	10.6 m	

5. SONUÇLAR ve YORUMLAR

Alınan işarete göre mesafe ölçümü için Log Distance Model ve LNSM ile 3 farklı senaryo ele alınmıştır ve bu senaryoların sonuçlarına göre ilk başta klasik üçgenleme metodu ile konumlandırma (alınan bütün işaretleri değerlendirmeye katıp konumlandırma) kullanılmıştır. İkinci olarak, önerdiğimiz ve uygulamasını yapıp olumlu sonuçlar aldığımız filtreli üçgenleme ve ağırlıklandırma metodu ile konumlandırma tekniği kullanılmıştır.

Tek bir yayın yapıcıdan gerçek zamanlı konum takibi için 1 sn içerisinde toplanabildiği kadar yayın toplanmıştır. Bu yayınlardan oluşan RSSI değerlerinin ortalaması, yani o noktadaki nihai RSSI değeri mesafe modellerinde kullanılır. Sonuçlar 3 farklı mesafe modelinde incelenmiştir.

3 farklı mesafe modelinin özellikleri aşağıda sıralanmıştır:

- Birinci mesafe modelinde Log-Distance model ele alınmıştır ve konumlandırma yapılacak olan ortam, alan, mekân için yol kaybı katsayısı değeri sabit ($n = 3$) kabul edilip mesafe hesaplaması yapılmıştır. Ayrıca yayın yapıcı taraf 100 ms’de bir olacak şekilde 3 frekans kanalını da kullanarak yayın yapmıştır.
- İkinci mesafe modelinde LNSM ele alınmıştır ve konumlandırma yapılacak olan ortam için yol kaybı katsayısı değeri ortamda referans ölçümler alınarak MMSE ile hesaplanmıştır, aynı zamanda ortamda gölgeleme etkisinin varlığı için sıfır ortalamalı Gauss rastgele değişkeninin standart sapma değeri hesaplanıp LNSM denklemi oluşturulmuştur. Oluşturulan bu denklem ile anchor-tracker arası mesafeler hesaplanmıştır. Ayrıca yayın yapıcı taraf 100 ms’de bir olacak şekilde 3 frekanstan da yayın yapmıştır.
- Üçüncü mesafe modelinde ise yine LNSM ele alınmıştır fakat ikinci olarak kullanılan mesafe modelinden kendini tek ayıran özellik yayın yapıcıların tek bir frekanstan yayın yapması olmuştur. Böyle olunca ortamda tekrar yol kaybı katsayısı belirlemek için referans ölçümler alınmıştır, MMSE ile yol kaybı katsayısı belirlenmiştir. Aynı zamanda yine gölgeleme etkisinin varlığı için sıfır ortalamalı Gauss rastgele değişkeninin standart sapma değeri hesaplanıp LNSM denklemi oluşturulmuştur. Oluşturulan bu denklem ile anchor-tracker arası mesafeler hesaplanmıştır. Ayrıca yayın yapıcı taraf tek bir frekanstan yayın yaptığı için örnek

sayısını artırılması gerekliliğinden 50 ms’de bir olacak şekilde tek frekanstan yayın yapmıştır.

Bu üç farklı modele göre konumlandırma işlemi standart klasik üçgenleme metodu ve akabinde önerdiğimiz filtreli üçgenleme ve ağırlıklandırma metodu uygulanarak yapılmıştır. Dolayısıyla elimizde 6 farklı senaryo bulunmaktadır ve bunlar aşağıdaki gibidir:

- 1- Log-Distance modeli ve klasik üçgenleme metodu ile konum tespiti,
- 2- Log-Distance modeli ve filtreli üçgenleme ve ağırlıklandırma metodu ile konum tespiti,
- 3- 3 frekanstan yayın ile LNSM ve klasik üçgenleme metodu ile konum tespiti,
- 4- 3 frekanstan yayın ile LNSM ve filtreli üçgenleme ve ağırlıklandırma metodu ile konum tespiti,
- 5- Tek frekanstan yayın ile LNSM ve klasik üçgenleme metodu ile konum tespiti,
- 6- Tek frekanstan yayın ile LNSM ve filtreli üçgenleme ve ağırlıklandırma metodu ile konum tespiti.

Tek frekanstan yayın ile 3 frekanstan yapılan yayının alıcıda indüklenmesinin karşılaştırması yapıldığında, örneğin alınan 10 adet örnek ölçümün (RSSI) standart sapmasının 3 frekanstan yapılan yayın için daha yüksek olduğu görülmüştür. Burada güvenilirliği daha yüksek (standart sapması daha düşük) olan tek kanal yayını ile çalışmanın konumlandırma işlemi için çok faydalı bir yol olacağı anlaşılmıştır. Yukarıda belirtilen 6 farklı senaryonun gerçek konumda alınan ölçümler ve bu ölçümler sonucunda tahmin edilen konumun gerçek konum ile arasındaki hata miktarlarının kıyaslaması Tablo 5.1’de gösterilmiştir.

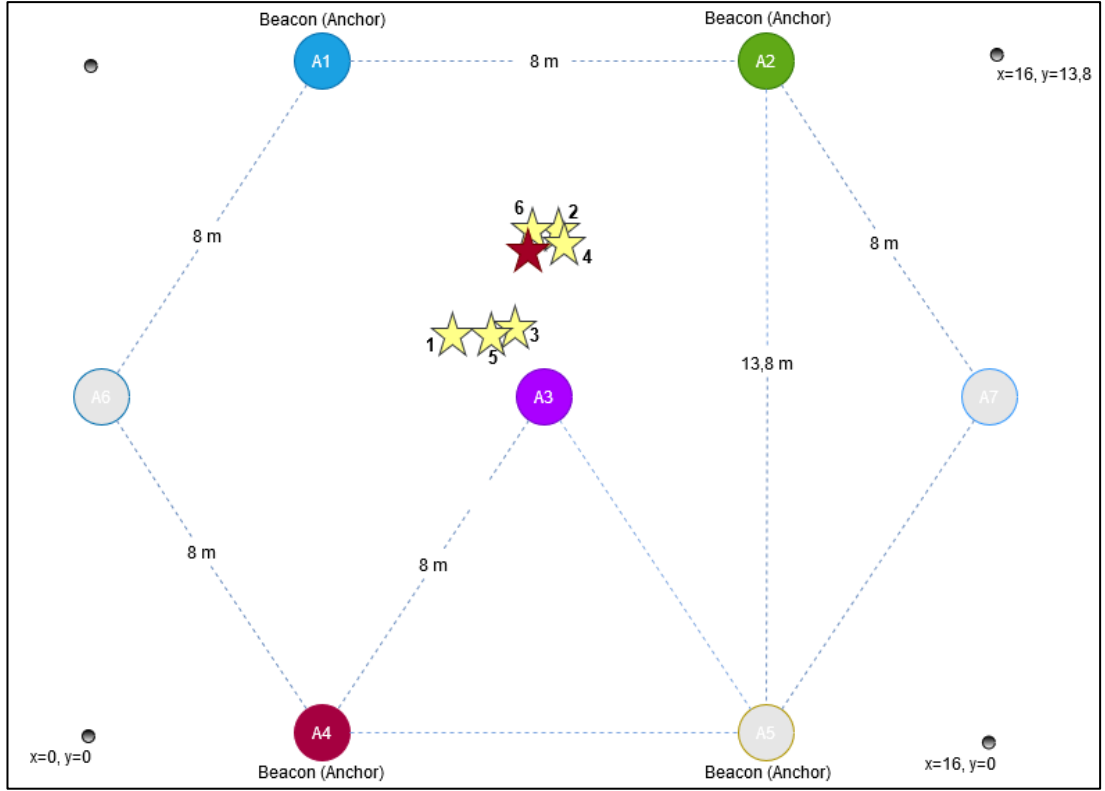
Tüm modellerin hata payları incelendiğinde öne çıkan model, LNSM ile mesafe ölçümü, tek frekans ile RSSI stabilizasyonu (varyans düşük) ve filtreli üçgenleme ve ağırlıklandırma metodu ile konum tespiti yapan modeldir. Filtreli üçgenleme modelinin en büyük avantajı uzak olan cihazı bulması ve bu cihazı elemesidir. Akabinde birbirine en yakın 3 anchor ile konumlandırmanın sağlanmasıdır.

Tablo 5.1: Bütün modellerin kıyaslanması

Senaryo NO	MESAFE MODELİ			KONUMLAN-DIRMA MODELİ	Gerçek Koordinat		Hesaplanan Koordinat		Gerçek ile hesaplanan arasındaki MESAFE FARKI
		Yol kaybı katsayısı (n)	3 (sabit)		X	Y	X	Y	
1	Log-Distance	Normal Gölgeleme (X_σ)	Yok	Klasik üçgenleme	7.8 m	10.2 m	6.7 m	8 m	2.46 m
2		Kullanılan yayın frekansları	CH37, CH38, CH39	Filtreli Üçgenleme ve Ağırlıklandırma	7.8 m	10.2 m	8.23 m	10.6 m	0.58 m
	LNSM- 3 CH	Yol kaybı katsayısı (n)	2,26		X	Y	X	Y	MESAFE FARKI
3		Normal Gölgeleme (X_σ)	2,95	Klasik üçgenleme	7.8 m	10.2 m	7,3 m	8,3 m	1.96 m
4		Kullanılan yayın frekansları	CH37, CH38, CH39	Filtreli Üçgenleme ve Ağırlıklandırma	7.8 m	10.2 m	8.28 m	10.38 m	0.51 m
	LNSM- TEK CH	Yol kaybı katsayısı (n)	2,29		X	Y	X	Y	MESAFE FARKI
5		Normal Gölgeleme (X_σ)	1,89	Klasik üçgenleme	7.8 m	10.2 m	7 m	8,2 m	2.15 m
6		Kullanılan yayın frekansları	CH38	Filtreli Üçgenleme ve Ağırlıklandırma	7.8 m	10.2 m	7,87 m	10.6 m	0.40 m

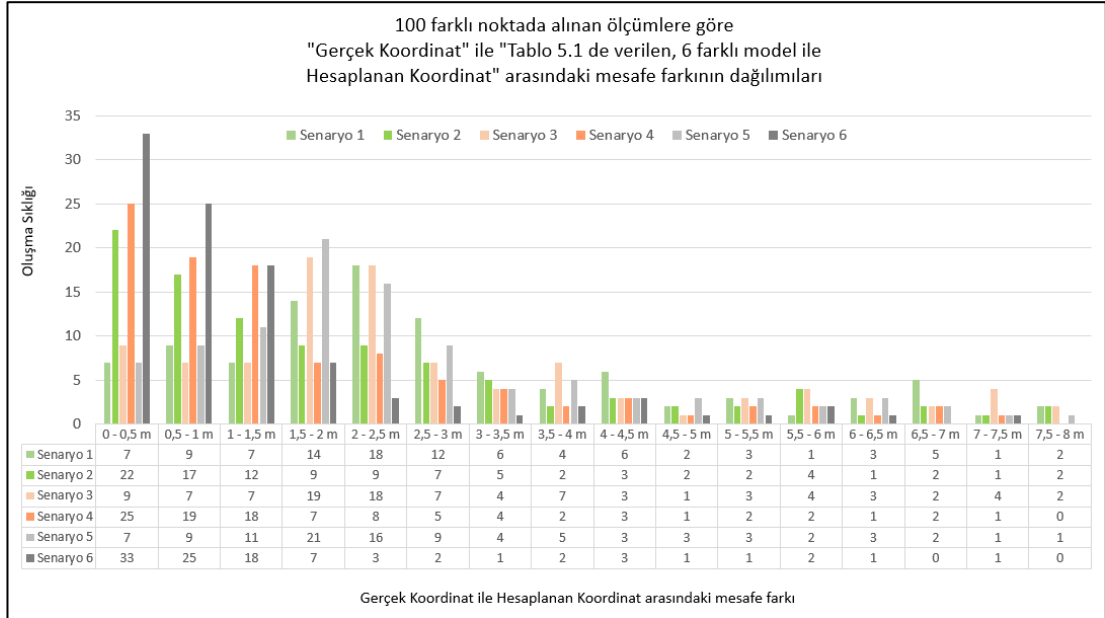
Şekil 5.1’de de Tablo 5.1’de verilen hesaplanan koordinatların, senaryo numaraları ile sarı yıldızlarla gösterilmiş durumu mevcuttur.

Tablo 5.1’de tek bir nokta için alınan ölçümlere göre gerçek koordinat ile 6 farklı model sayesinde hesaplanan koordinat arasındaki farklar gösterilmiştir. Bu 6 farklı modelin, bu kat planı üzerinde farklı bölgelerde alınan ölçümler neticesinde gerçek koordinat ile hesaplanan koordinat arasındaki farklar Şekil 5.2’de gösterilen grafik ile toplu bir şekilde belirtilmiştir. 100 farklı noktada alınan ölçümler Tablo 5.1’de bahsedilen 6 farklı senaryoya (modele) verilerek koordinat hesaplamaları yapılmıştır. Gerçek koordinat ile hesaplanan koordinatlar arasındaki mesafe farkı 0.5 m aralıklı Şekil 5.2’de gösterilen tabloya aktarılmıştır. Görüleceği üzere “Senaryo 6” yani “LNSM-TEK CH” ve “Filtreli Üçgenleme ve Ağırlıklandırma” metodu ile daha az hata payı elde edilmiştir. 100 ölçümden 33’ü 0-0,5 m arasında, 25’i 0,5-1 m arasında, 18’i 1-1,5 m arasında hata payı ile konum tespiti sağlamıştır. Sonuç olarak 1,5 m hata payı toleransı ile %76 (33 + 25 + 18) oranla “Senaryo 6” ile konum tespiti



Şekil 5.1: Tüm modellerden elde edilen koordinatların kat planı üzerinde gösterimi.

sağlanırken, %23 (7 + 9 + 7) oranla “Senaryo 1” ile konum tespiti yapılmaktadır.



Şekil 5.2: 100 farklı konumda alınan ölçümlerin tüm modellerdeki hata payları.

KAYNAKLAR

- [1] Web 1, (2020), https://inst.eecs.berkeley.edu/~ee290c/sp18/note/BLE_Vol6.pdf, (Erişim Tarihi: 11/07/2020).
- [2] Web 2, (2020), https://tr.wikipedia.org/wiki/Alınan_sinyal_gücü_göstergesi, (Erişim Tarihi: 18/06/2020).
- [3] Wilson J., Patwari N., (2011), "See-Through Walls: Motion Tracking Using Variance-Based Radio Tomography Networks", IEEE Transactions on Mobile Computing, 10 (5), 612-621.
- [4] Rappaport T.S., (2002), "Wireless Communications, Principles and Practice", 1st Edition.
- [5] Cho K., Park W., Hong M., Park G., Cho W., Seo J. and Han K., (2014), "Analysis of Latency Performance of Bluetooth Low Energy (BLE) Networks", Sensors, 15 (1), 59-78.
- [6] Ghamari M., Villeneuve E., Soltanpur C., Khangosstar J., Janko B., R. Sherratt, S., Harwin W., (2018), "Detailed Examination of a Packet Collision Model for Bluetooth Low Energy Advertising Mode", IEEE Access, 6 (1), 46066-46073.
- [7] Web 3, (2020), <https://www.cypress.com/file/136236/download>, (Erişim Tarihi: 11/07/2020).
- [8] Naranjo-Hernández D., Reina-Tosina J., Roa L. M., (2019), "Lessons Learned About the Design and Active Characterization of On-Body Antennas in the 2.4 GHz Frequency Band", Sensors, 20 (1), 224-241.
- [9] Powar J., Gao C., Harle R., (2019), "Assessing the impact of multi-channel BLE beacons on fingerprint-based positioning", 2017 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN), 1-8, Sapporo, Japan, 18-21 September.
- [10] Poveda-García M., Gómez-Alcaraz A., Gil-Martínez A., Cañete-Rebenaque D., Martínez-Sala A. S., Gómez-Tornero J. L., (2017), "Frequency-Scanned Active Monopulse Radar based on Bluetooth Low Energy Devices using an Array of Two Planar Leaky-Wave Antennas", 2019 IEEE-APS Topical Conference on Antennas and Propagation in Wireless Communications (APWC), 390-393, Granada, Spain, 9-13 September.
- [11] Huang B., Liu J., Sun W., Yang F., (2019), "A Robust Indoor Positioning Method based on Bluetooth Low Energy with Separate Channel Information", Sensors, 19 (16), 1-19.

- [12]Yapeng W., Xu Y., Yutian Z. and Yue L., Laurie C., (2013), "Bluetooth Positioning using RSSI and Triangulation Methods", IEEE 10th Consumer Communications and Networking Conference (CCNC), 837-842, Las Vegas, NV, USA, 11-14 January.
- [13]Gadicherla S., (2018), "Data Analysis and Memory Methods for RSS Bluetooth Low Energy Indoor Positioning", Yüksek Lisans Tezi, Aalto University.
- [14]Davidson P. and Pich R., (2017), "A survey of selected indoor positioning methods for smartphones" IEEE Communications Surveys Tutorials, 19 (2), 1347-1370.
- [15] Schulten H., Kuhn M., Heyn R., Dumphart G., Trosch F., WittnebenA., (2019), "On the Crucial Impact of Antennas and Diversity on BLE RSSI-Based Indoor Localization", IEEE 89th Vehicular Technology Conference, 1-6, Kuala Lumpur, Malaysia, Malaysia, 28 April-1 May.
- [16]Mohammed S.L., (2016), "Distance Estimation Based on RSSI and Log-Normal Shadowing Models for ZigBee Wireless Sensor Network", Engineering and Technology Journal, 34 (15), 2950-2959.
- [17]Sümer N.N., Ataklı N., Kucur O., (2020), "Kapalı Alan Konum Tespitinde RSSI Tabanlı Düşük Enerjili Bluetooth Kullanımı", Uluslararası Bilgisayar Bilimleri ve Mühendisliği Konferansı, 1-5, Diyarbakır, Türkiye, 9-11 Eylül.

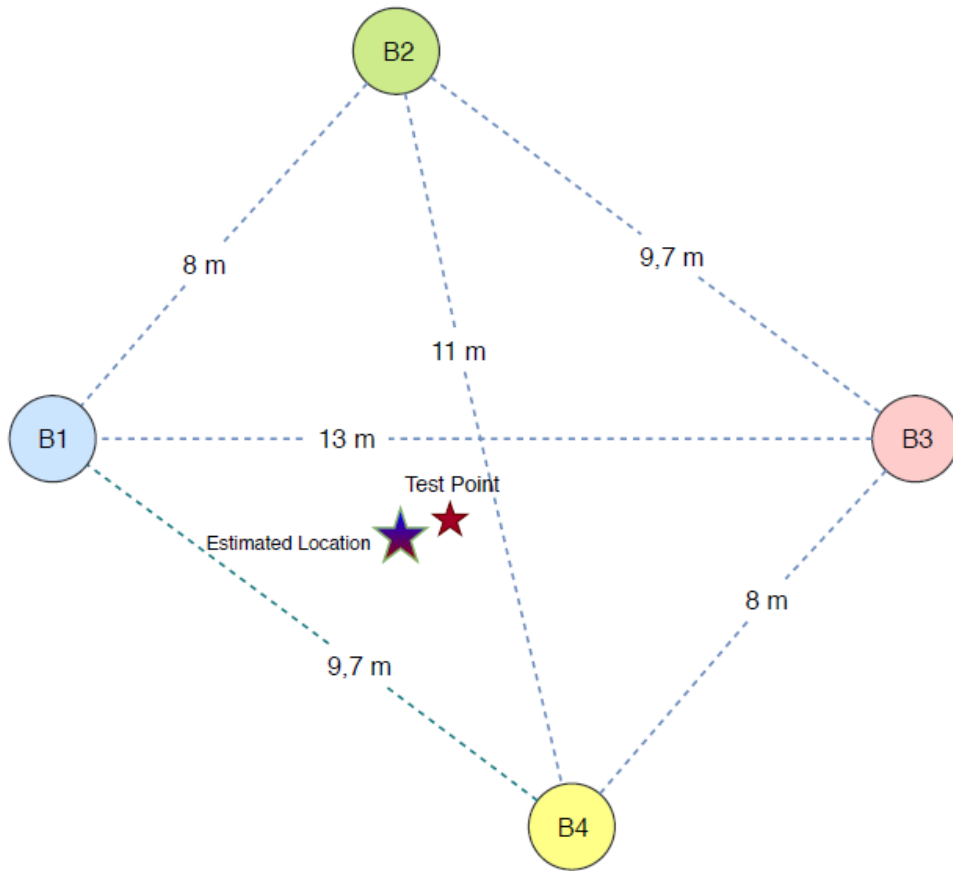
ÖZGEÇMİŞ

Niyazi Nadi Sümer 1992 yılında İstanbul’da doğdu. 2011 yılında başladığı T.C. Maltepe Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği ve Bilgisayar Mühendisliği Bölümlerini 2016 yılında başarıyla tamamlamıştır. 2018 yılında yüksek lisans eğitimine Gebze Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalında başladı. 2016 yılında Koztek Enerji Sistemlerinde Test Devreye alma mühendisi olarak çalıştıktan sonra 2017 yılında Trio Mobil Bilişim Sistemleri A.Ş’de IoT Ar-Ge merkezinde Bluetooth kapalı alan konumlandırma sistemleri üzerinde çalışmalarını sürdürmektedir.

EKLER

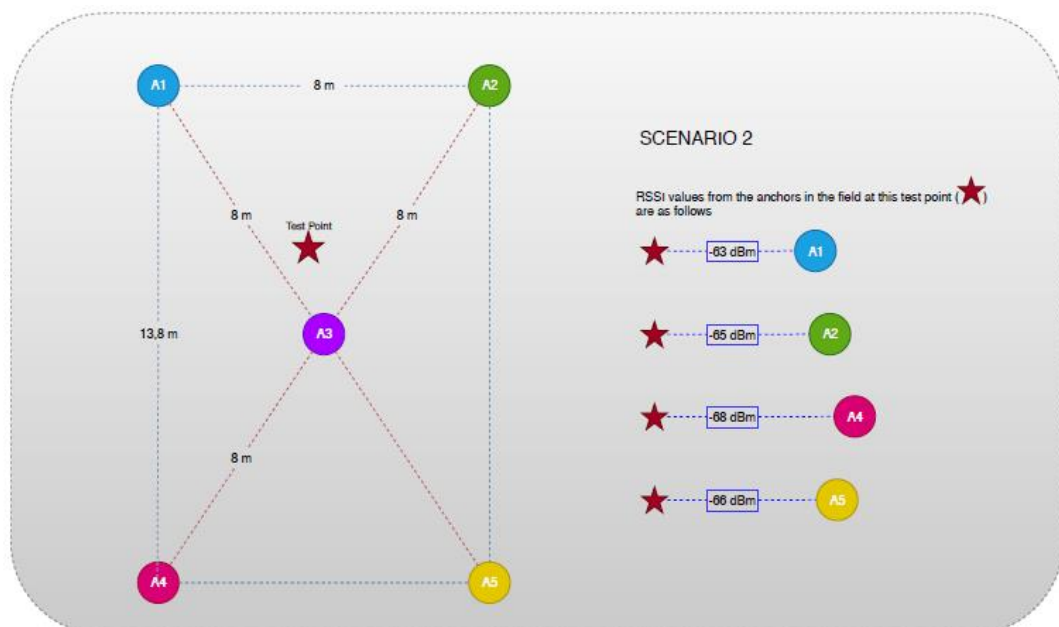
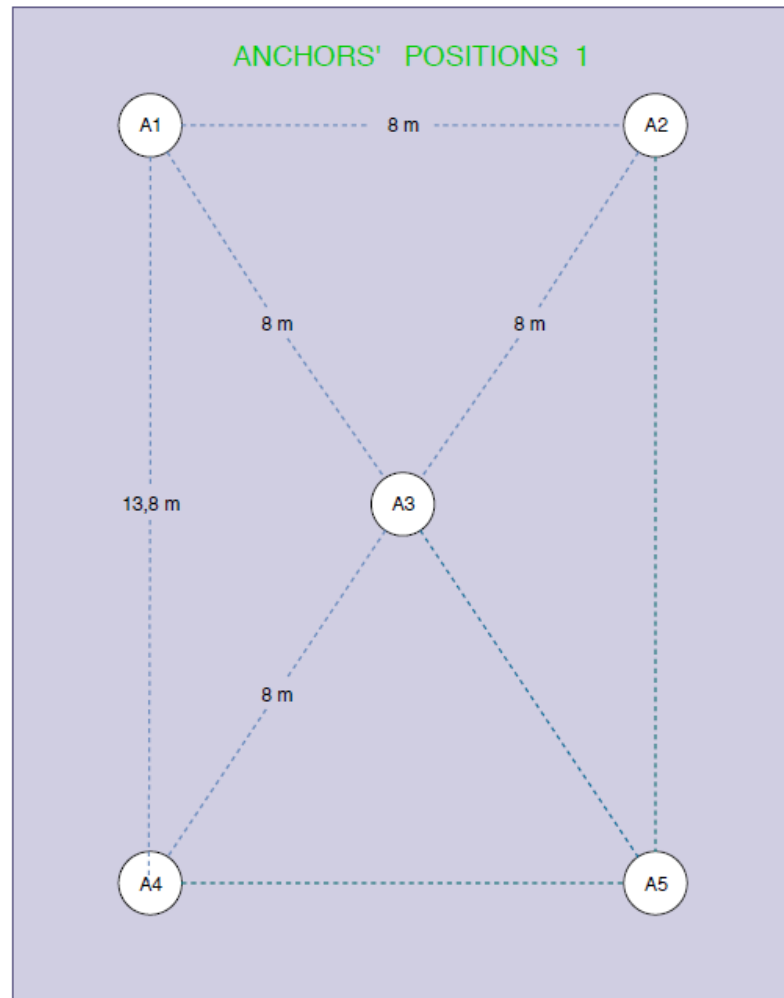
Ek A: Filtreli Üçgenleme ve Ağırlıklandırma metoduyla konum tespitinde, alandaki farklı düzendeki anchor yerleşimi için ve alınan işaretlere göre farklı filtreleme metotlarına dair kapsamlı anlatım

POSITIONING ALGORITHM CASES for BLE with TRILITERATION METHOD

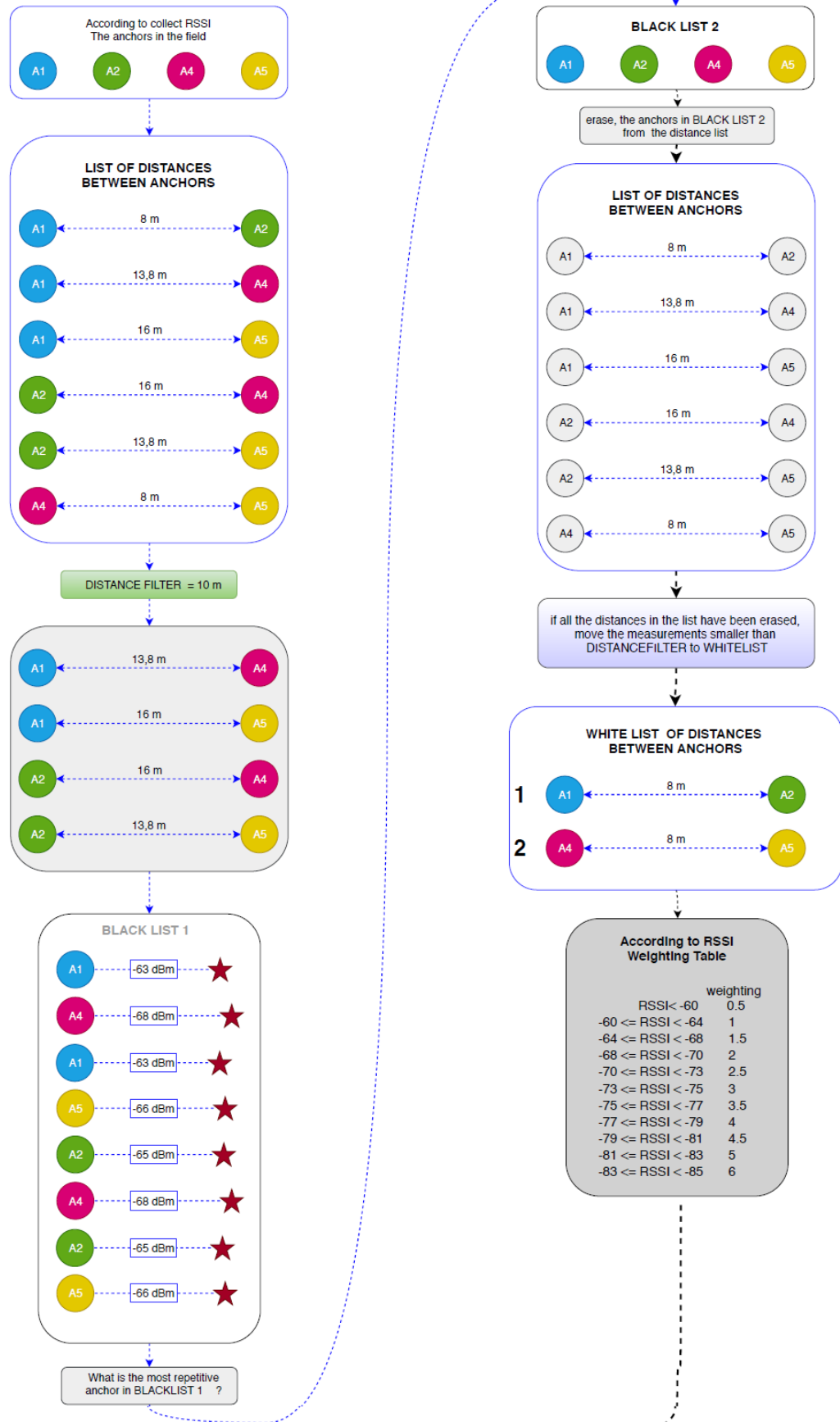


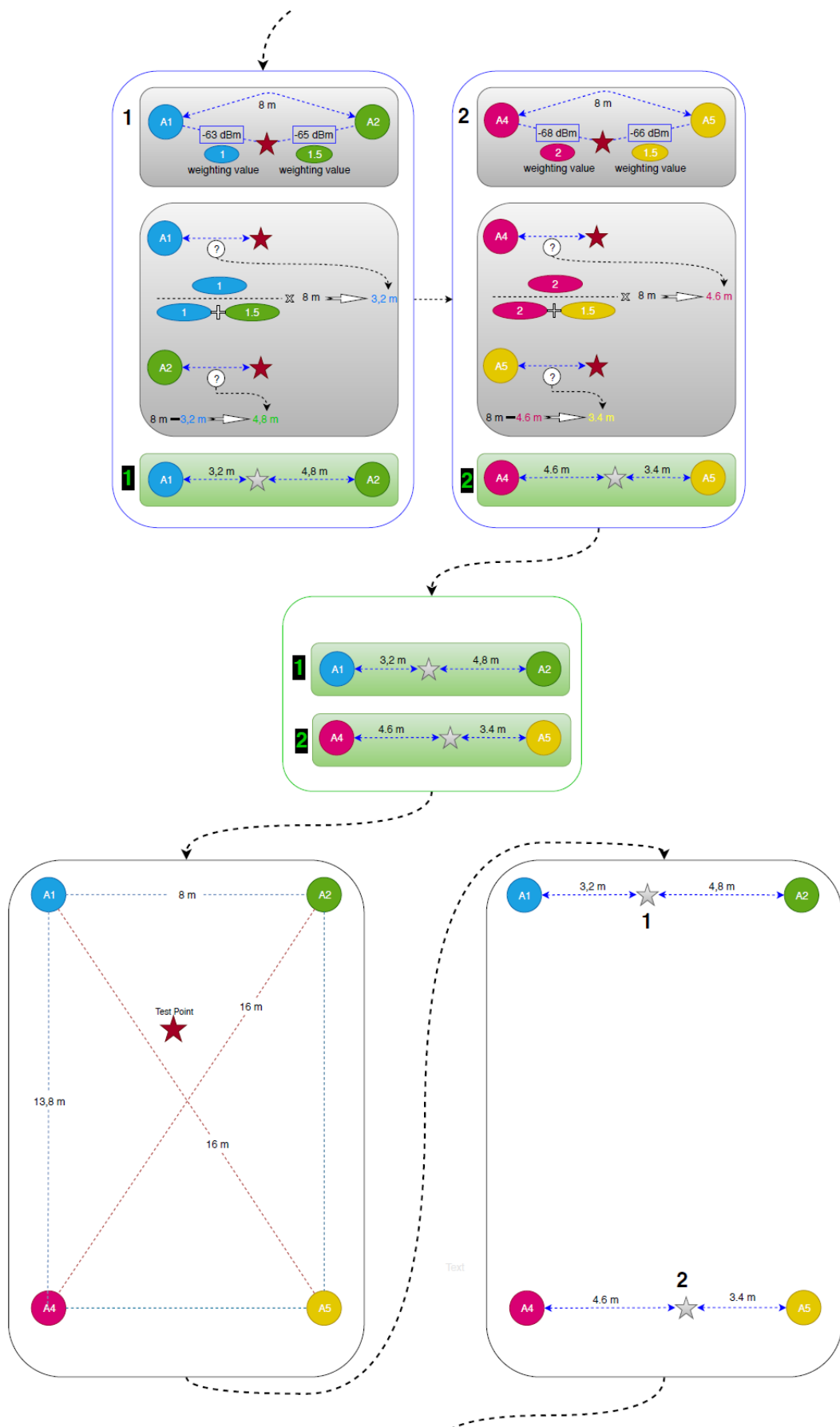
Note

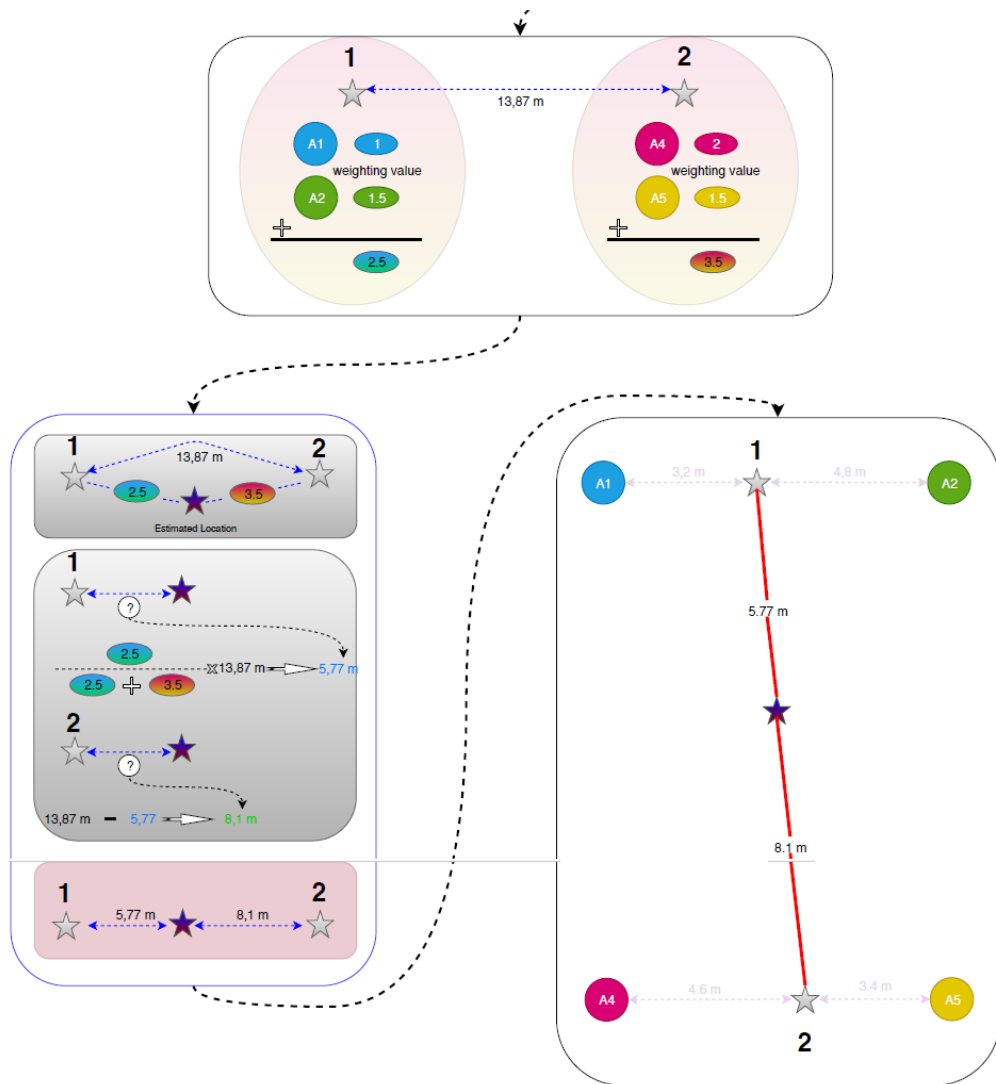
- A method different from conventional methods (algorithm) is used for triangulation
- Only a few scenarios (based on data from anchors) are considered for different positioning (anchor positioning). It is shown how the algorithm should be created. An exact (a continuous) algorithm is not created.



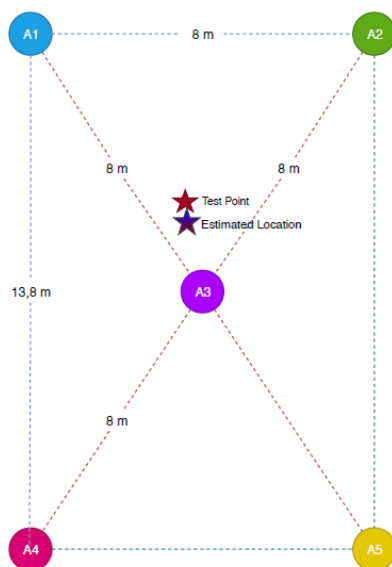
CALCULATIONS

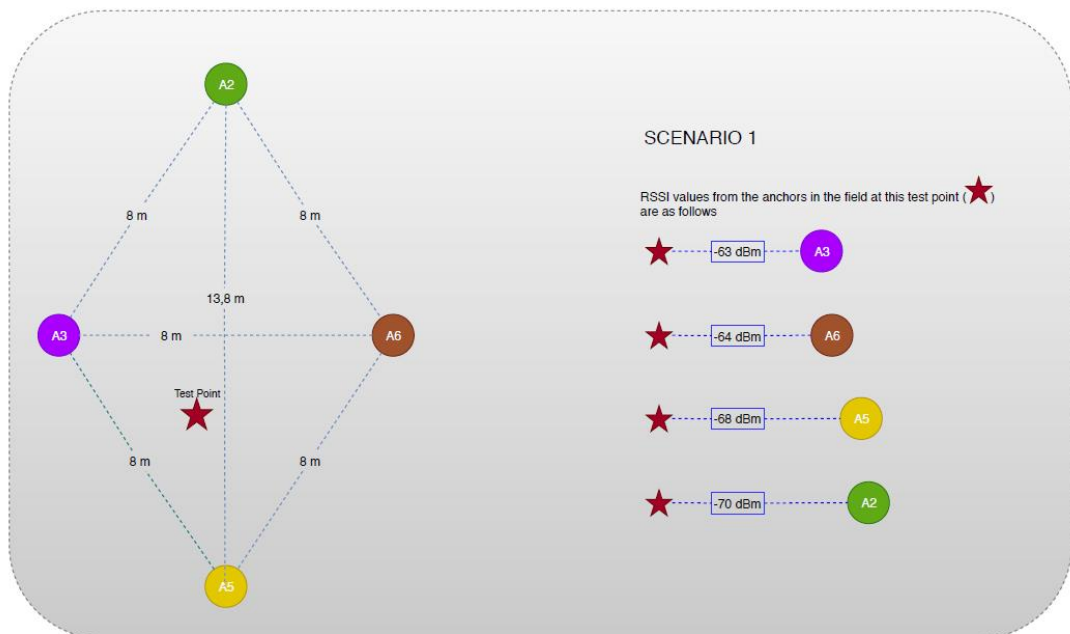
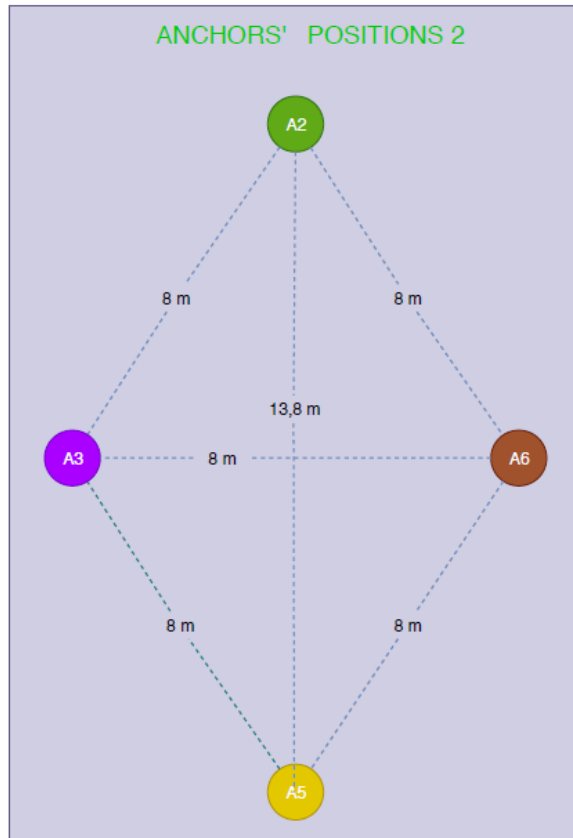




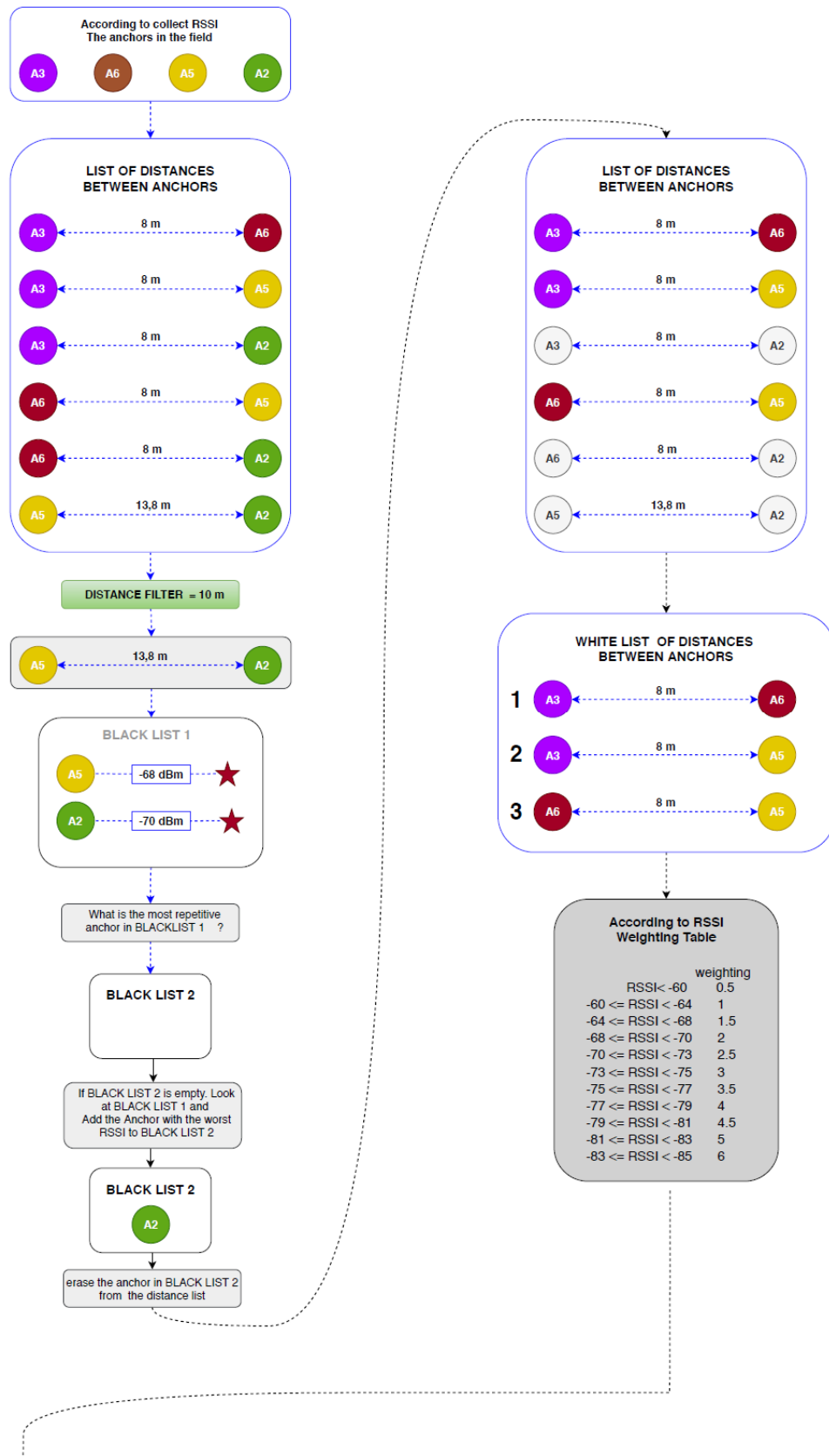


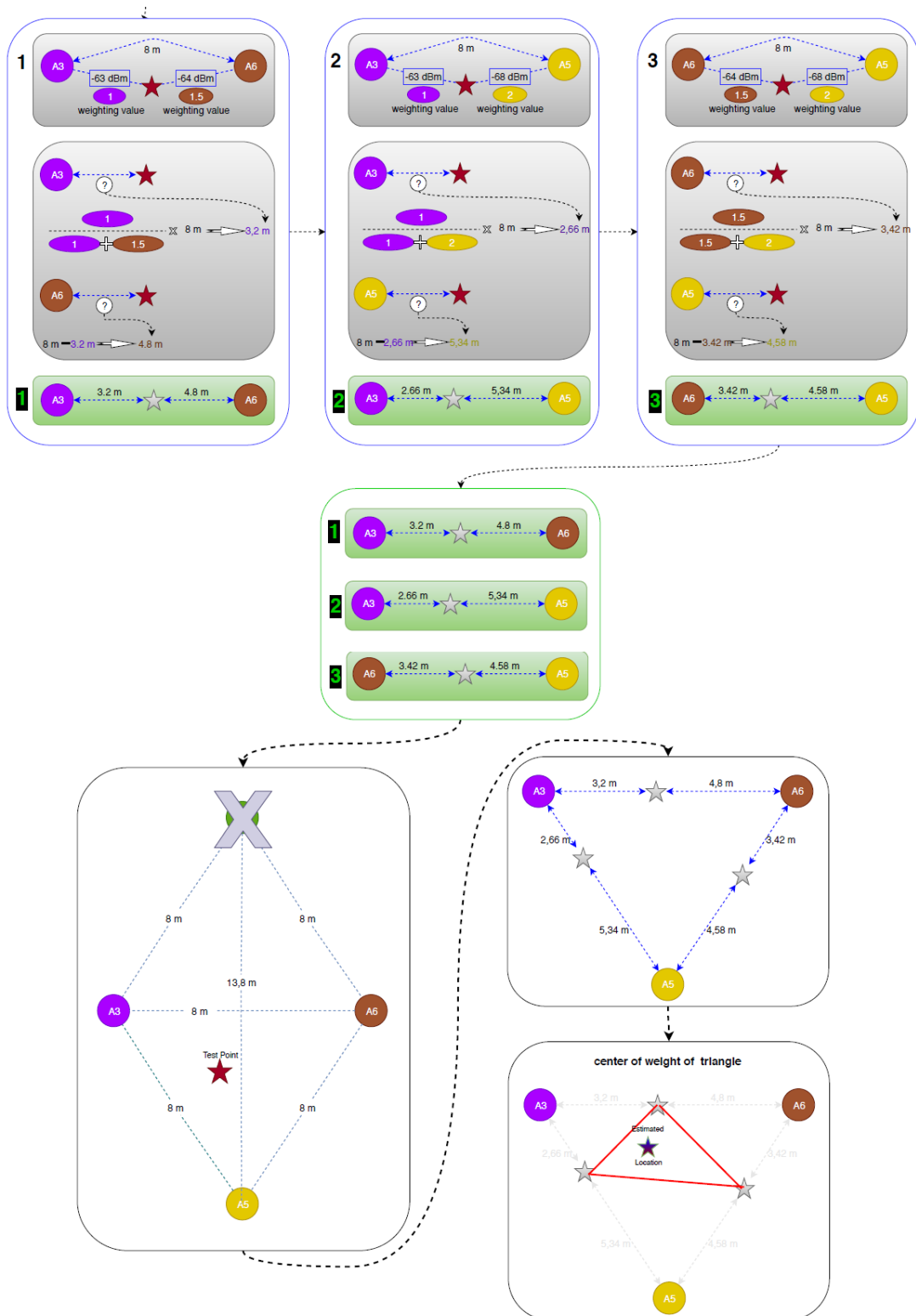
RESULT



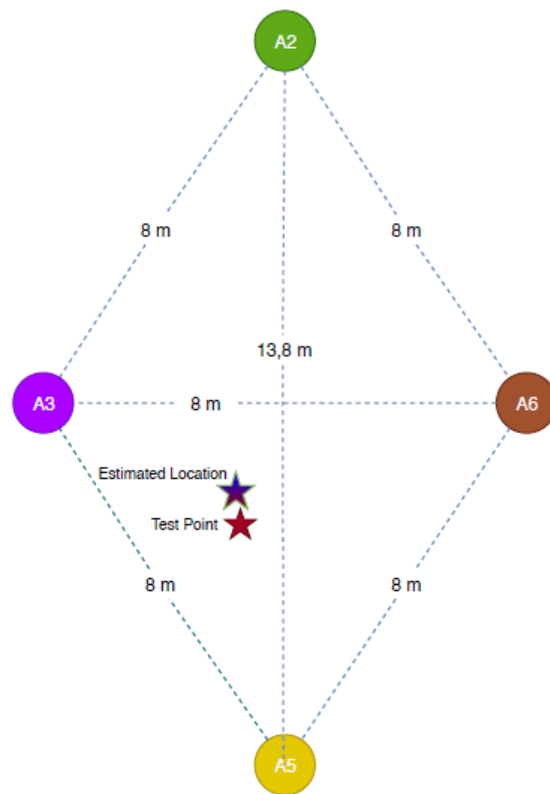


CALCULATIONS

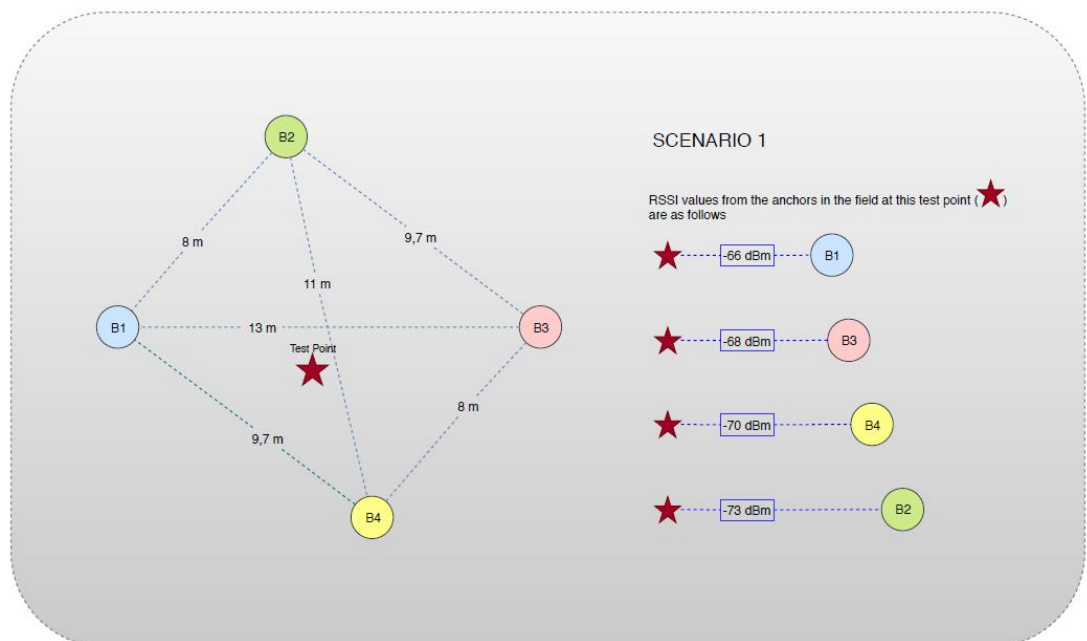
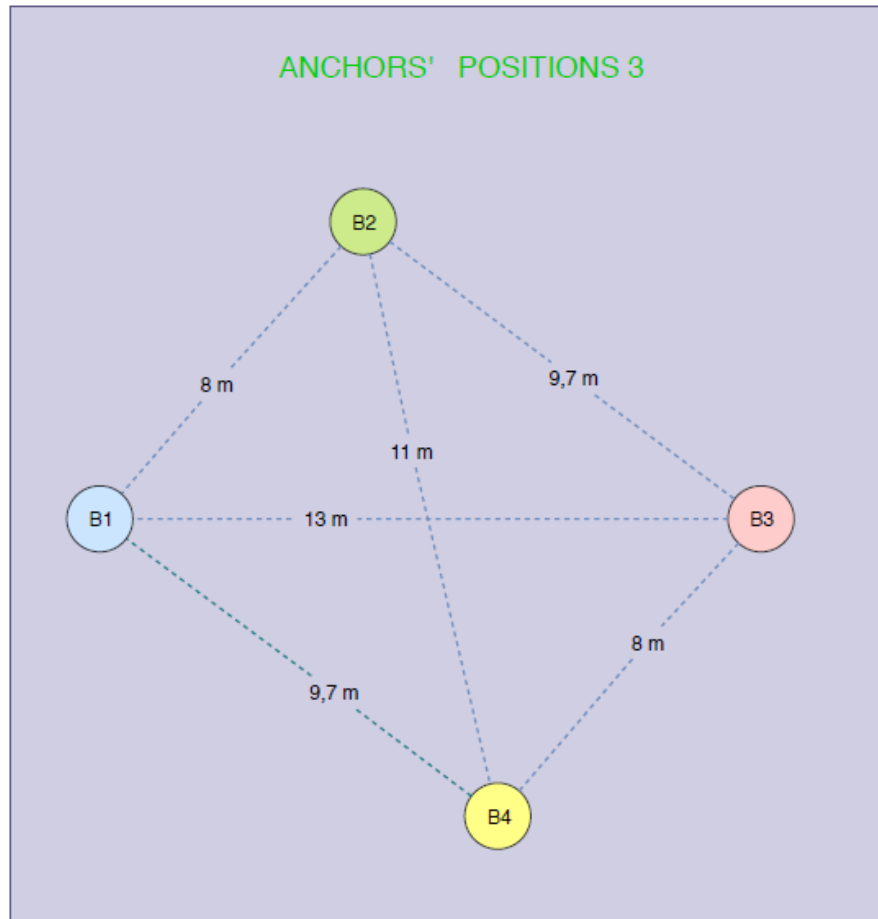




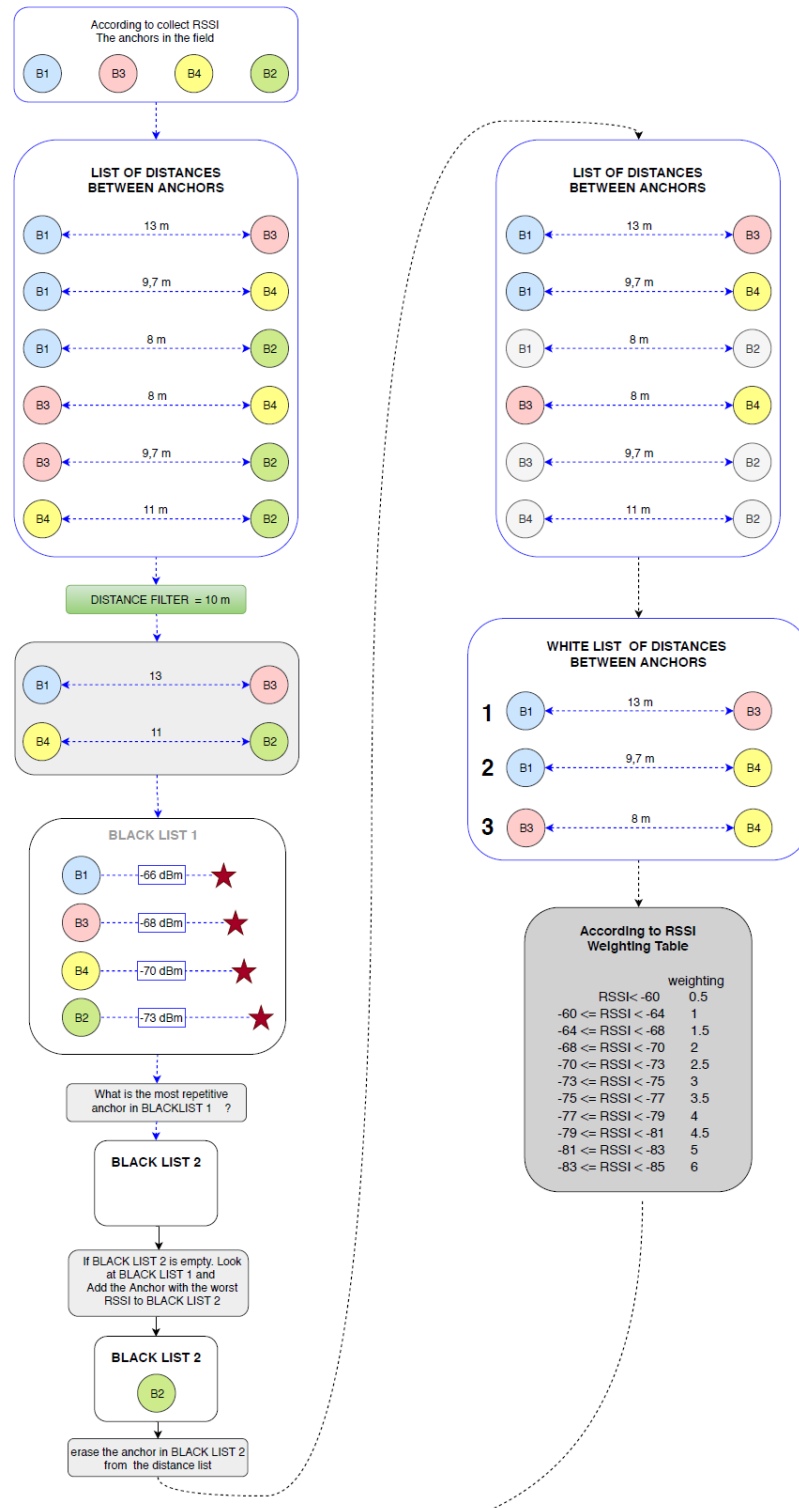
RESULT

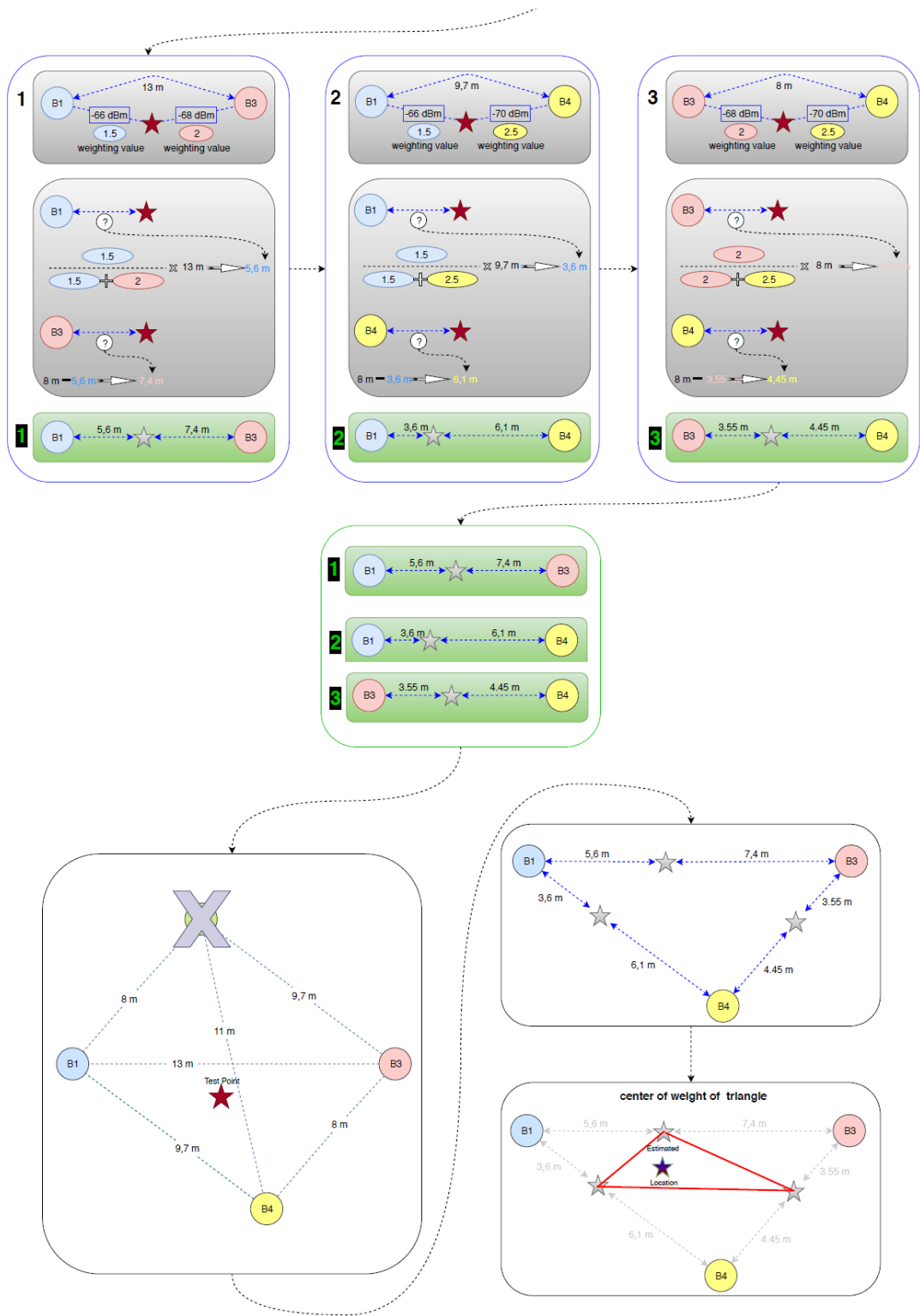


if anchors are not positioned properly

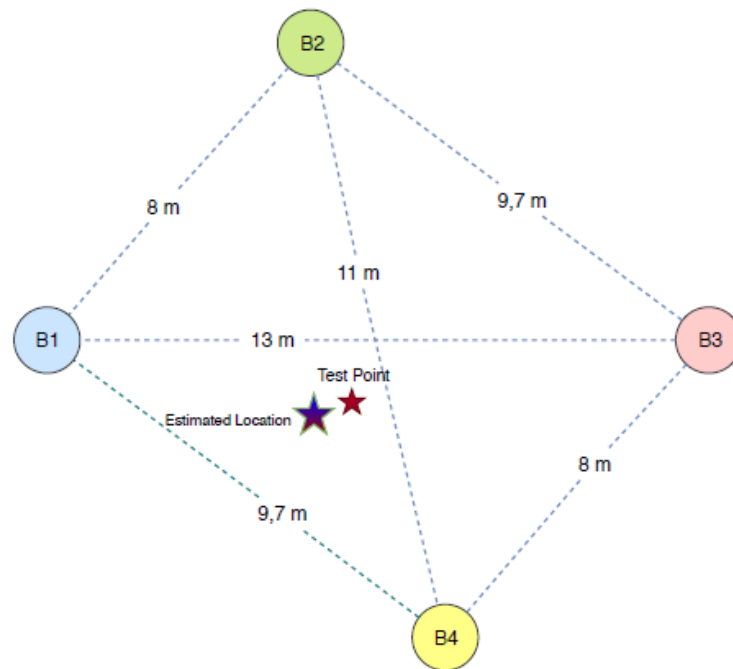


CALCULATIONS

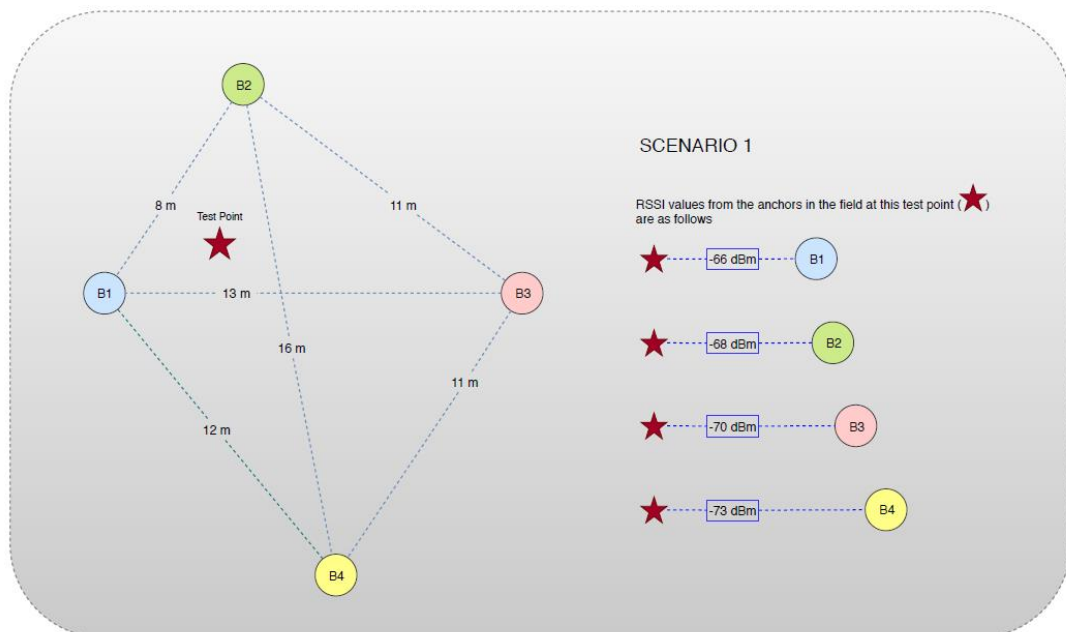
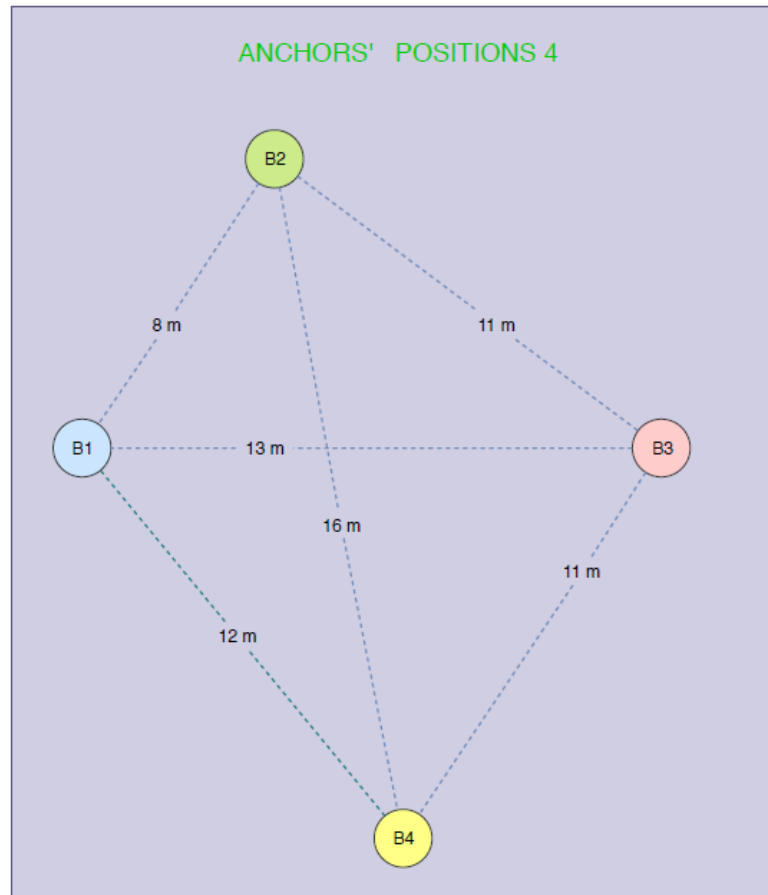




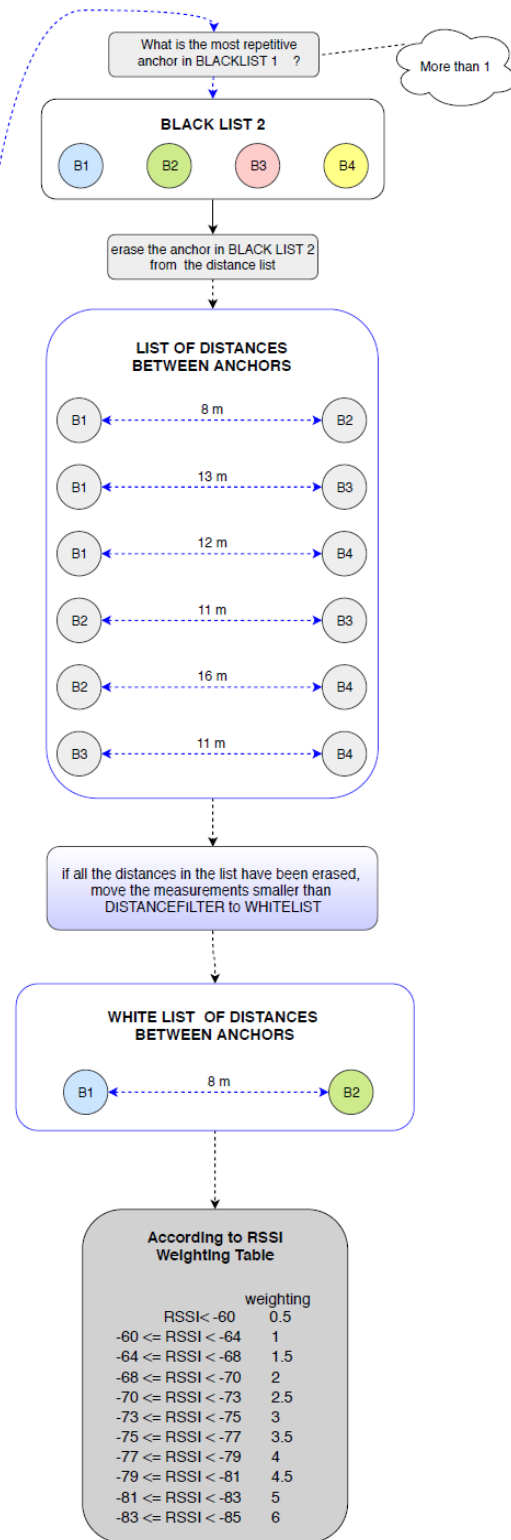
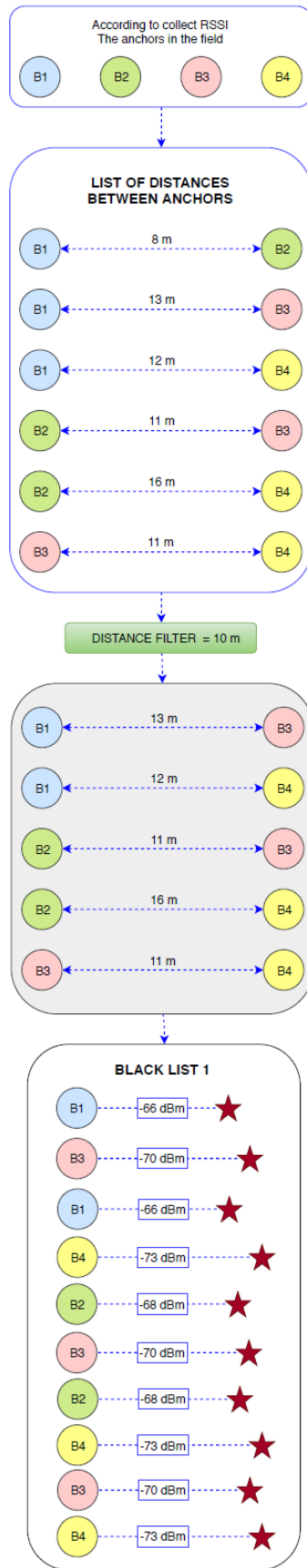
RESULT

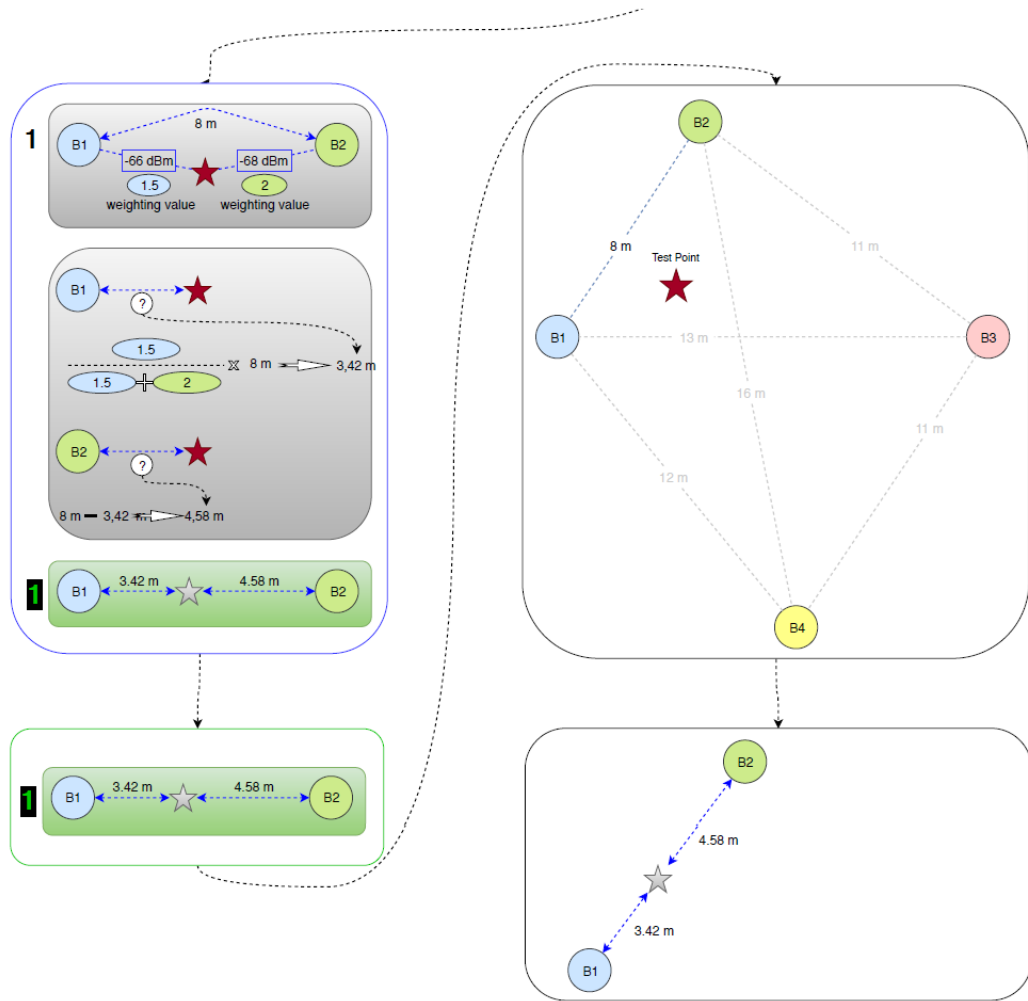


if anchors are not positioned properly



CALCULATIONS





RESULT

