

Wireless Signals and Modulation-1

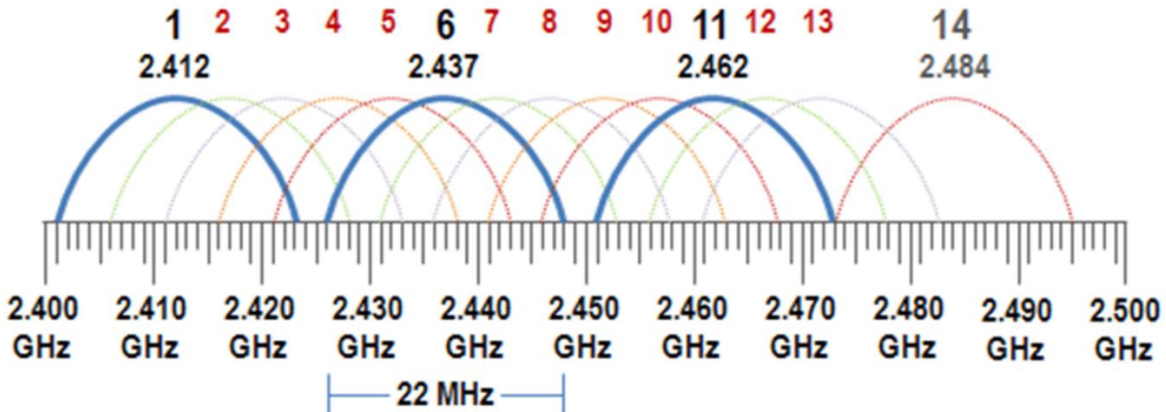
Kablolardan geçen elektrik akımı aynı zamanda kablo etrafında da bir elektromanyetik alan oluşturur. Bu alan içerisindeki bir başka iletken maddeye elektromanyetik dalgaların çarpmasıyla aktarılabilir. Kablosuz haberleşmenin temelinde de bu yatmaktadır. Bir antenden çıkan elektromanyetik dalgaların bir başka antene çarpmasıyla veri iletimi gerçekleşiyor. Bu süreçte veri hava ortamında iletilirken aynı zamanda zayıflıyor. Verinin hedef anten üzerinde değerlendirilebilmesi için belirli bir seviyenin üzerinde olması gerekiyor.

Kablosuz yayınlar için kullanılan frekans bantları aslında ücretli. Telekom firmaları kullandıkları frekans bantları için lisans ücretleri ödüyor. Kullanıcılar içi ise ücretsiz bırakılan iki frekans bandı aralığı belirlenmiştir (ISM). Bu aralığa bakıldığında;

- 2.400 GHZ – 2.4835 GHZ
- 5.150 GHZ – 5.825 GHZ (aralığın tamamı kullanılmıyor)
 - 5.150 GHZ – 5.250 GHZ
 - 5.250 GHZ – 5.350 GHZ
 - 5.470 GHZ – 5.725 GHZ
 - 5.725 GHZ – 5.825 GHZ

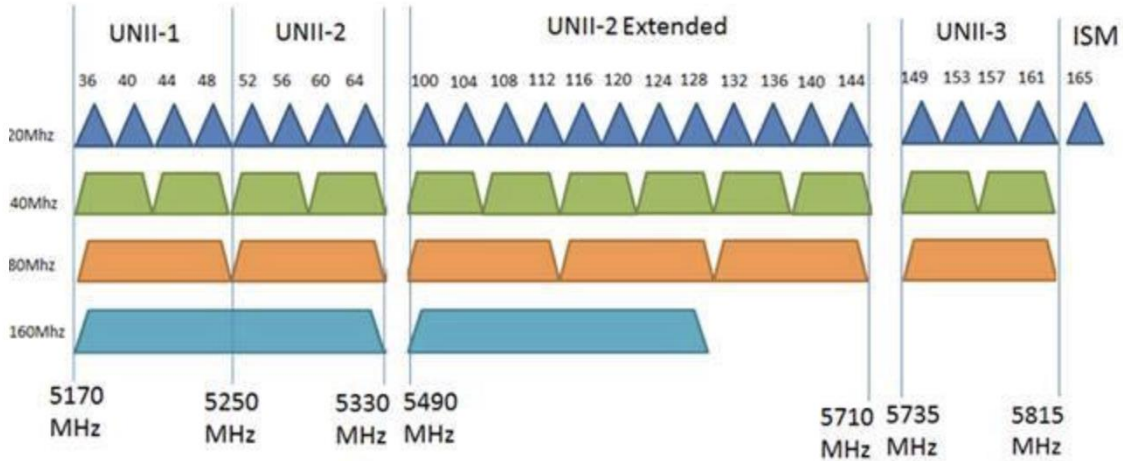
Normalde frekans bandı üzerinde 20 Ghz'lik yayınlar yapılıyor. Bu yayınların tarif edilmesini kolaylaştırmak adına her 5 Ghz'e bir numara veriliyor ve her numaraya kanal deniliyor. Yayının merkezinde kalan MHz değerine karşılık gelen numara o yayının kanal numarası oluyor. Örnek olarak 2.400 Ghz ile 2.420 Ghz arasında yapılan bir yayının merkezi 2.410 MHz yani 1. Kanala denk geliyor. Bu yayın için 1. Kanaldan yayın yaptığı söylenir.

2.4 Ghz Frekans bandı aralığı için belirlenen kanalların durumuna bakıldığında bir yayının aynı zamanda 4 kanalı kaplayacak büyüklükte yayın yaptığı görülebilir. Bu durumda iki yayının birbirlerini etkilememesi/çakışmaması (interfere etmemesi) için yayınlar arasında yeterince aralık olması gerekiyor (iki yayın arasında en azından 5 kanal aralık olmalı). Yayınların çakışmaması için Avrupa ve Amerika 'da birbiriyle çakışmayan toplamda 3 farklı kanal bulunuyor. Bunlar 1,6 ve 11. Kanallardır (Bunun nedeni kullanılan frekans bandının toplamda 13 kanala sahip olmasıdır). Japonya'da ise 1,6,11 ve 14. Kanallardan yayın yapılabilir (Japonya'da ise ücretsiz olarak belirlenen frekans bandı 2.435 Ghz yerine 2.495 Ghz'e kadar olmasından kaynaklı. Bu sayede frekans bandı üzerinde toplamda 14 kanala sahip olabiliyor).



2.4 Ghz bandında (802.11b standardı için) kanalların birbirini interfere etmesini önlemek amacıyla 802.11gn standardında farklı modülasyon teknikleri kullanılarak bu probleme bir noktaya kadar çözüm getirilmiştir.

Kablosuz yayınlarda internet hızını yükseltmek için aynı anda iki kanalın kullanılabilmesi gibi alternatifler çözümler geliştirilse de kanal sayısının sınırlı olmasından dolayı bu çözüm günümüzde pek tercih edilmemektedir. Bunun yerine kablosuz yayınlarda internet hızını yükseltmek için çok daha yüksek frekans aralığına ve kanal sayısına sahip olan 5 Ghz bandı tercih ediliyor (Ne yazık ki 5 Ghz bandı da her cihazda desteklenmiyor).



5 Ghz bandı için UNII-1, UNII2, UNII-2-EXTENDED ve UNII-3 olmak üzere 4 farklı aralıktan bahsedilmektedir. Avrupa’da UNII-1 (4 kanal), UNII2 (4 kanal) ve UNII-2-EXTENDED (11 kanal) aralıklarıyla toplamda 19 kanal kullanılabiliyor. Amerika’da ise UNII-3 (4 kanal) aralığı da dahil toplamda 22 kanal kullanılabilmektedir.

2.4 Ghz bandında olduğu gibi 5 Ghz bandında da kanallar birleştirilerek bant genişlikleri iki katına çıkarılabiliyor. Her ne kadar kanal sayısı daha fazla olsa da 5 Ghz bandının kapsama alanı 2.4 Ghz’e göre daha küçüktür (frekans arttığında dalga boyu da kapsama alanı da küçülür).

Kablosuz yayınlarda RF (Radyo Frekans) cihazlarında sinyalin gücünü tanımlamak için watt, miliwatt veya Desibel birimleri kullanılıyor. 2.4 Ghz için Avrupa regülasyonuna göre bir kablosuz RF cihazı 50 mW (miliwatt) üzerinde olamazken Amerika’da ise bu sınır 100 mW (miliwatt) olarak belirlenmiştir.

Bir yayın kaynak cihazdan hedef cihaza ulaştırılana kadarki süreçte (hava yoluyla - kablosuz) kablo üzerinde antene aktarılırken, anten üzerinden havaya aktarıldığında, iletim süresince birçok çevre etkeni de dahil olmak üzere pek çok çevre biriminden etkilenmektedir. Yayının etkilendiği çeşitli çevre birimlerini tek bir birim üzerinde temsil edebilmek ve iletimi boyunca gerçekleştireceği güç değişimini hesaplayabilmek için güç birimi olarak desibel kullanılmaktadır (anten kazancı da kablo kaybı da desibel cinsinden hesaplanmaktadır). Radyo frekansının gücünü ölçebilmek için kullanılan formüle bakıldığında (buradaki P₀ değeri isotropic antenin güç değeridir – 1 mW);

$$N_P = 10 \log_{10} \left[\frac{P}{P_0} \right] dB$$

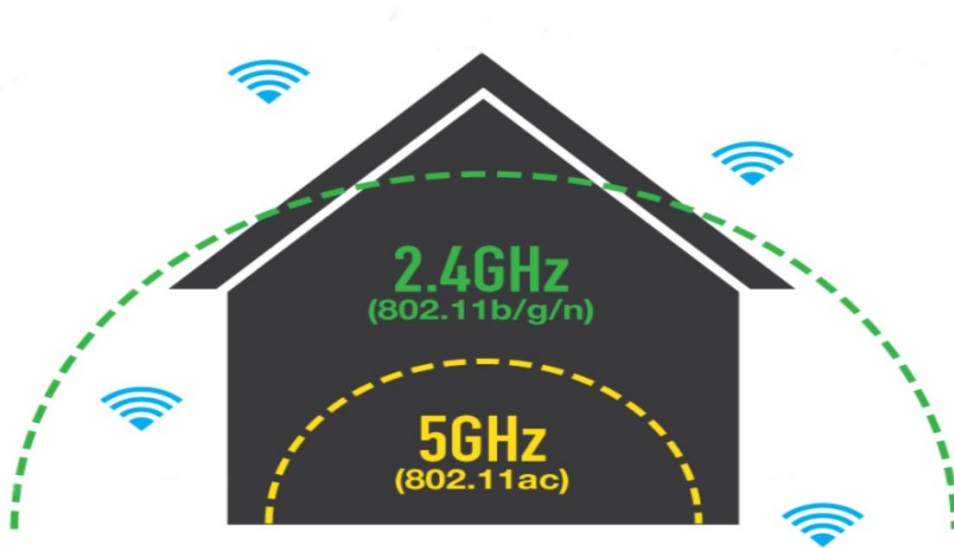
EIRP (Effective Isotropic Radiated Power)

EIRP, isotropic anteni baz alarak hesaplanan kaynak cihazdan havaya aktarılacağı antene gidene kadarki süreçte değişim gösteren desibel değerinin miktarı olarak tanımlanabilir (EIRP = Tx Power – Tx Cable + Tx Antenna). Bu değer Avrupa standardında EIRP sınırı 25 desibeldir. Yani yayının cihazdan çıkıp havaya bırakılmadan önceki süreçte total desibel değeri 25 desibeli aşmamalıdır.

Örnek olarak 17 desibel olan kaynak cihazdan kablo üzerinden antene ulaşacağı süreçte 2 desibel kaybı olduğunda (17-2=15), kablo üzerinden antene geçtikten sonra anten üzerinde (4 desibellik anten) 4 desibellik kazanç elde etmesi durumunda (15+4=19),s yayın Avrupa standartlarına uygun değerlerde yayın yapmış olur.

Free Space Path Loss

Yayın kaynaktan çıktığı andan itibaren hava ortamında genişleyerek/dağılarak yayılmaya başladığı için sinyal gücü büyük miktarda zayıflıyor. Bu zayıflamaya Free Space Path Loss deniliyor.

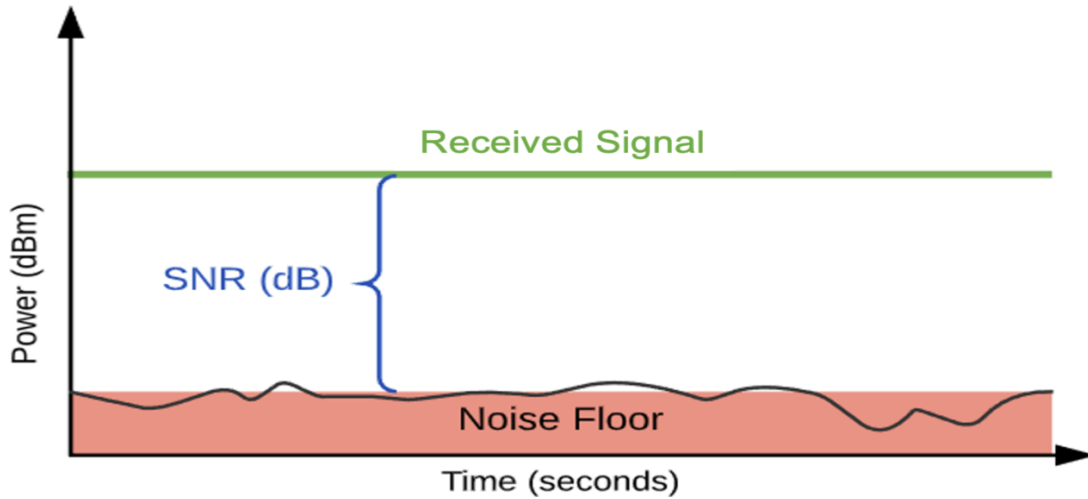


Günün sonunda yayından kullanıcıya ulaşan sinyal gücünün değerlendirilebilmesi için ölçülebilmesi gerekiyor. **RSSI (Received Signal Strength Indicator)**, kullanıcıya ulaşan sinyal gücünün bir ölçümüdür. inSSIDer (Windows), Kismet (Linux), Wifi Analyser (Android), Airport Utility (IOS) gibi uygulamalar RSSI değerini belirleyen yazılımlara örnek olarak verilebilir.

Sinyal gücü kaynaktan kullanıcıya ulaşana kadarki süreçte (Free Space Path Loss) sinyal gücü büyük ölçüde zayıfladığı için kullanıcıda sinyal gücü negatif olarak görünür. Bunun nedenine bakıldığında sinyal yayılmaya başladığı anda büyük miktarda zayıflıyor. Bu azalma her mesafe artışında daha da azalıyor/farklı bir ifadeyle hava ortamında sinyal gücü mesafe arttıkça yarıya düşerek azalıyor da denilebilir. Sonuç olarak çevre etmenlerin de etkisiyle kullanıcıya ulaştığında negatif desibel değerlerine ulaşmış oluyor. Bu durum aynı zamanda sinyal gücü sıfıra ne kadar yakınsa o kadar güçlü olduğu anlamına gelmektedir. Kullanıcıya ulaşan sinyal gücü göz önüne alındığında yayın gücü aşağıdaki gibi değerlendirilmektedir;

RF Experience	RSRP (dBm) Reference Signal Received Power	RSRQ (dB) Reference Signal Received Quality	SINR (dB) Signal to Interference & Noise Ratio
Excellent	≥ -80	≥ -10	≥ 20
Good	-80 to -90	-10 to -15	13 to 20
Mid Cell	-90 to -100	-15 to -20	0 to 13
Cell Edge	≤ -100	≤ -20	≤ 0

Sinyal gücü yüksek bir yayın kullanıcıya ulaşıyor olabilir ama bu yayının kaliteli olduğunu göstermez. Farklı bir kaynaktan yapılan yayın, hizmet alınan yayının üzerinde geliyor olabilir. Bu durumda kullanıcıya her ne kadar güçlü yayın ulaşırsa ulaşsın kullanıcı istenen kalitede hizmet alamayacaktır. Yayının kalitesini ölçmek için **SNR (Signal to Noise Ratio)** adı verilen bir değer göz önünde bulunduruluyor. **SNR**, aynı frekans bandı kullanılarak yapılan yayınlar arasındaki desibel farkına verilen isimdir. Bu değer ne kadar yüksek olursa alınan yayın kalitesinin o kadar yüksek olduğunu anlaşılr.



Modülasyon

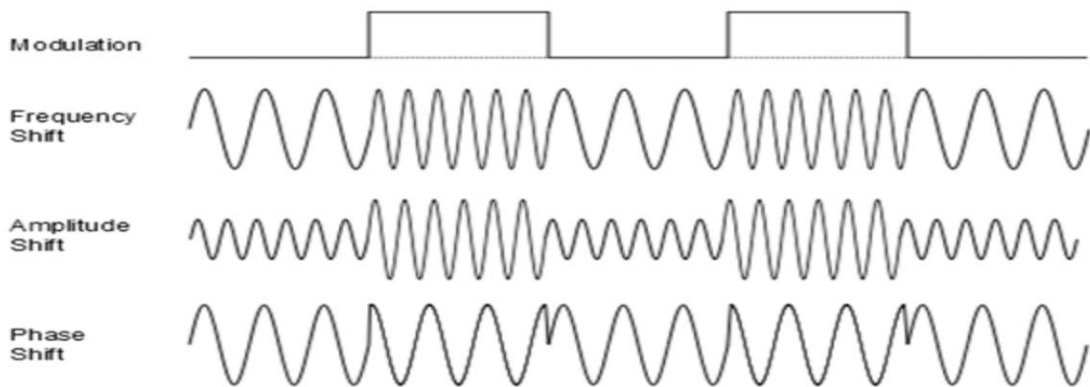
Modülasyon, verinin iletildiği ortam üzerindeki temsil edilme biçimi olarak tanımlanabilir. Örnek bir modülasyon olarak bakır kablo üzerinden veri taşınırken;

- Kaynak ve hedef cihaz arasında
 - o her 5 voltun (0'dan farklı herhangi bir voltaj değerinin) 1
 - o her 0 voltun 0 olarak algılanıp işlenmesi verilebilir.
- Kaynak ve hedef cihaz arasında
 - o her 0-1.5 volt arasında gelen gücün 00
 - o her 1.5-3 volt arasında gelen gücün 01
 - o her 3-4.5 volt arasında gelen gücün 10
 - o her 4.5-6 volt arasında gelen gücün 11 olarak işlenmesi verilebilir.

Örnek olarak verilen iki modülasyon tekniğinden ikincisinde her ne kadar birim zamanda daha fazla veri taşınsa da voltaj değerindeki küçük değişimler bile verinin hedefte yanlış değerlendirilmesine neden olabiliyor. İlk örnekte 0 voltun üzerindeki herhangi bir değer 1 olarak değerlendirilebiliyor ama ikinci örnekteki en küçük voltaj değişimi dahi verinin yanlış değerlendirilip işlenmesine, yani verinin bozulmasına neden oluyor (Bozuk paket drop edilecektir ve TCP protokolü kullanılıyorsa paketin yeniden talep edilmesi gerekecektir). Bu örnekten de çıkarılabileceği gibi modülasyon tekniği değiştikçe tek seferde daha fazla veri taşınabiliyor ama bu durum daha iyi bir altyapı gereksinimini de arttırıyor.

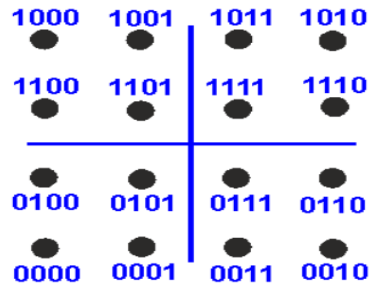
Bakır kablo üzerinde değişken dirençlerle karşılaşmadığı için veriyi voltaj değeri üzerinden modüle edebilmek mümkün olsa hava ortamında gürültü ve parazitle karşı karşıya kalındığı için veri bu denli hassas aralıklarla modüle edilemiyor. Bunun yerine veriler yayının **frekansı, genliği** veya **fazı** üzerinden modüle ediliyor.

- **AM** (Amplitude Modulation), sinyalin genliği üzerinden yapılan modülasyondur.
- **FM** (Frequency Modulation), sinyalin frekansı üzerinden yapılan modülasyondur.
- **PM** (Phase Modulation), sinyalin fazı üzerinden yapılan modülasyondur.

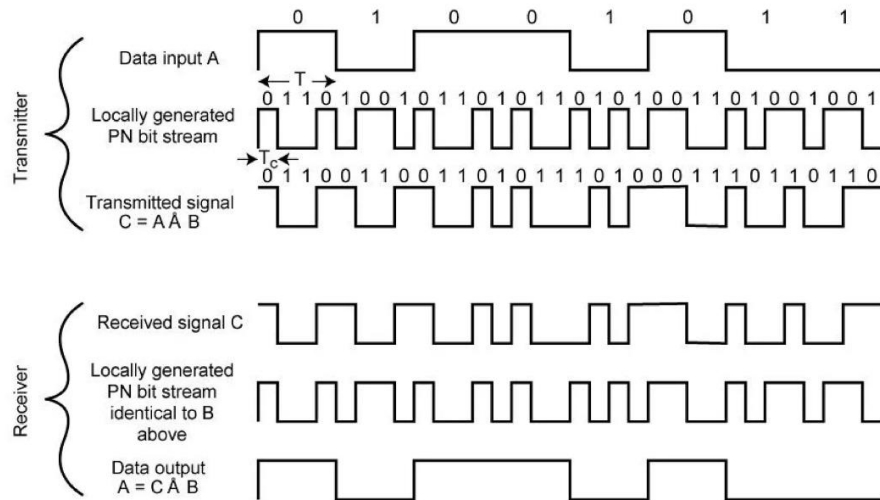


- **QAM** (Quadrature Amplitude Modulation), aynı frekansta olup birbirleri arasında 90 derece faz farkı bulunan iki taşıyıcı sinyalin (sinyaller I ve Q ile temsil edilir) modüle edilmesiyle oluşur. Bu sinyaller matematik biliminde Sinüs ve Kosinüs olarak bilinir. Hedef üzerinde bu sinyaller tekrar ayrıştırılarak orijinal sinyallere dönüştürülmektedir. Orijinal sinyaller matematiksel işlemler sonucunda sayısal koordinat düzlemindeki yerleri tespit edilerek işlenir.

- Detaylı bilgi için
https://panel.kku.edu.tr/Content/eem/documents/eem_ornek_proje_raporu.pdf adresini 10. Sayfadan itibaren inceleyebilirsiniz.



- **DSSS** (Direct Sequence Spread Spectrum), gönderilecek her bir bitlik veri birden çok bit ile temsil edilen bir örüntü olarka gönderilir. Örnek vermek gerekirse 1 biti 10010101001 örüntüsü ile temsil edilirken, 0 biti 10110001101 örüntüsüyle temsil edilerek hedefe gönderiliyor. Bu bit örüntüsüne “chipping code” adı veriliyor.
 - Bu teknikte gönderilen sinyal düşük güçlü geniş bantlı bir sinyal olarak göreceği için birçok dar bant alıcısı bu sinyali gürültü olarak kabul eder ve reddeder.
 - Her bir bit bir örüntü olarka gönderildiği için arada bozulmalar yaşansa dahi alıcı kısmında bozulan kısımlar tahmin edilerek veri yeniden oluşturulabilir. Bu sayede verinin tekrar gönderilmesine gerek kalmaz.



- **FHSS** (Frequency Hopping Spread Spectrum), dar bant taşıyıcı sinyalinin rastgele ama biline bir düzende frekans değerleri arasında atlamalar yaparak veriyi iletme yöntemidir.
 - Çalışma şekline bakıldığında verici bir atlama kodu seçerek sinyal gönderir. Veriyi alacak taraf da kendisini bu atlama koduna göre ayarlanır. Bu sayede veri farklı frekans kanallarından gönderilse de alıcı tarafta tekrar bir bütün haline getirilebilir.
 - Bir atlama frekansındaki azami bekleme süresi 400 ms’dir.
 - FHSS tekniği DSSS tekniği ile kıyaslandığında veri aktarım sürecinin izlenmesi veya bilginin çalınması açısından daha güvenlidir. Bu nedenle yoğunlukla askeri sistemlerde kullanılmaktadır.
 - IEEE 802.11 standardında kullanılmaktadır ve 2 Mbps’a kadar veri iletimi sağlamaktadır.

- **OFDM** (Orthogonal Frequency Division Multiplexing), tek bir taşıyıcıyı yerine çok sayıda taşıyıcı kullanılarak gerçekleştirilen modülasyon tekniğidir. RF sinyalleri daha küçük alt sinyallere bölünerek aynı anda farklı frekanslardan gönderilir.
 - o DSSS ve FHSS teknikleriyle kıyaslandığına veri iletimi açısından en verimli yöntemdir.

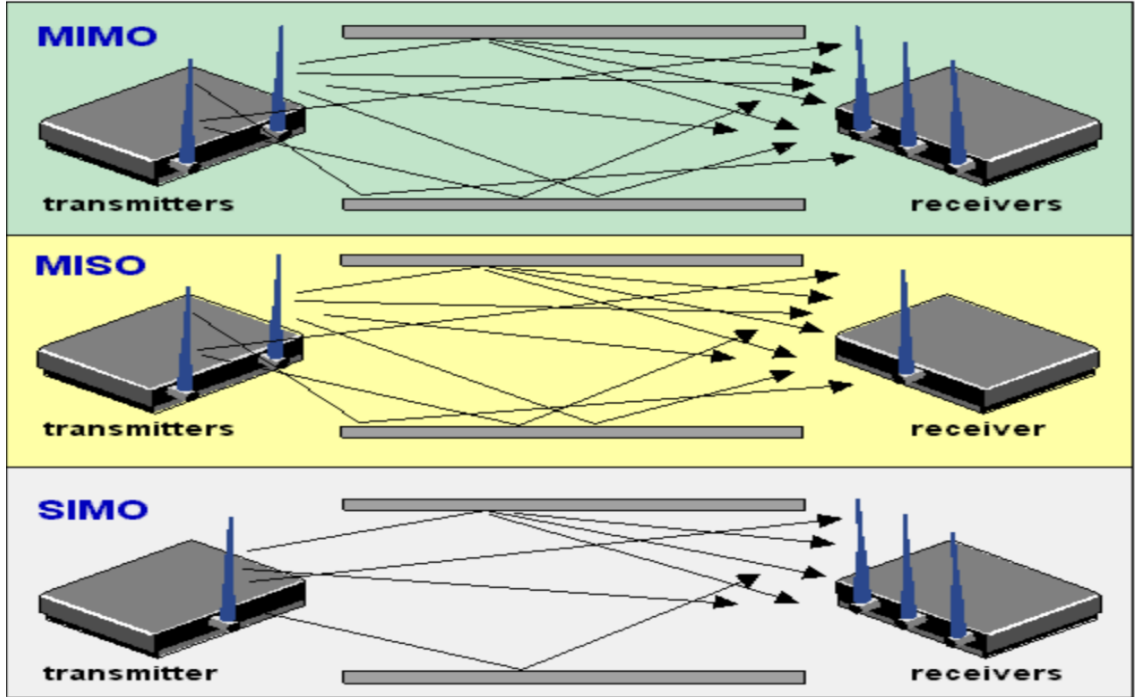
	802.11 (Legacy)	802.11b (Legacy)	802.11a (Legacy)	802.11g (Legacy)	802.11n (HT)	802.11ac (VHT)	802.11ax (HE)
Year Ratified	1997	1999	1999	2003	2009	2014	2019 (Expected)
Operating Band	2.4 GHz/IR	2.4 GHz	5 GHz	2.4 GHz	2.4/5 GHz	5 GHz	2.4/5 GHz
Channel BW	20 MHz	20 MHz	20 MHz	20 MHz	20/40 MHz	20/40/80/160 MHz	20/40/80/160 MHz
Peak PHY Rate	2 Mbps	11 Mbps	54 Mbps	54 Mbps	600 Mbps	6.8 Gbps	10 Gbps
Link Spectral Efficiency	0.1 bps/Hz	0.55 bps/Hz	2.7 bps/Hz	2.7 bps/Hz	15 bps/Hz	42.5 bps/Hz	62.5 bps/Hz
Max # SU Streams	1	1	1	1	4	8	8
Max # MU Streams	NA	NA	NA	NA	NA	4 (DL only)	8 (UL & DL)
Modulation	DSSS, FHSS	DSSS, CCK	OFDM	OFDM	OFDM	OFDM	OFDM, OFDMA
Max Constellation / Code Rate	DQPSK	CCK	64-QAM, 3/4	64-QAM, 3/4	64-QAM, 5/6	256-QAM, 5/6	1024-QAM, 5/6
Max # OFDM tones	NA	NA	64	64	128	512	2048
Subcarrier Spacing	NA	NA	312.5 kHz	312.5 kHz	312.5 kHz	312.5 kHz	78.125 kHz

Special Stream, 802.11n ve üzeri standartlarda kullanılan teknolojidir. Kablosuzlarda kullanılan bant genişliğini yükseltmek için geliştirilmiştir.

SISO (Single-n Single-out), tek anten kullanılarak yapılan yayına/veri iletimine deniliyor. Yayın yapan cihaz üzerinde her ne kadar iki anten bulunsun da bu antenlerde daha iyi yayın alan anten (kullanıcıya daha yakın olan) üzerinden veri aktarımı yapılırken diğer anten kullanılmadan bekletiliyordu (802.11a,b,g standartları bu şekilde çalışıyor).

Yayın yapılırken geniş bir çevreye yayıldığı için kaynak cihazdan hedef cihaza doğrudan ulaşan sinyaller olduğu gibi çevre nesneler üzerinden yansıyarak hedefe ulaşan sinyaller de oluyor. Bu durumda hedef cihaza çevre nesnelerden yansıyarak ulaşan sinyaller doğrudan ulaşan sinyalleri zayıflatabiliyor. Buna **Multipath Distortion** deniliyor (Yayın aynı anda aynı frekanstan farklı uzay yayılımlarından hedefe ulaşıyor).

MIMO (Multiple-in Multiple-out), Multipath Distortion probleminde çevre nesnelere yansıyarak hedef cihaza ulaşan yayınları baz alarak bağlantı hızını artırılmasını sağlayan teknolojidir. Çevre nesnelerden yansıyarak hedefe ulaşan sinyallerin aynı frekanstan farklı yayınlar gibi görülmesi sağlanıyor ve bağlantı hızı 2-3 kat artırılabilir (**Spatial Multiplexing**). Bu süreçte yayın yapılan cihazların sahip oldukları antenlerin hepsi aktif kullanıldığı için anten sayısı bağlantı hızında etkin rol oynuyor denilebilir (802.11ax standardıyla beraber 8 antene kadar destek sağlanabiliyor). Çevre nesnelerden yansıyan sinyaller üzerinden bağlantı hızı artırıldığı için küçük ve nesne sayısı fazla alanda alınan verime kıyasla boş bir alanda alınan verim çok düşük oluyor.



| → MIMO teknolojisi kullanılarak yansıyan sinyaller üzerinden kişiye özel dalga boylarını yönlendirilebiliyor. Bunu da kullanıcının daha iyi hizmet alacağı şekilde beam/huzme gönderilerek sağlanıyor.

Maximal Ration Combining

Normalde hava ortamında daha fazla veri taşıyabilmek için sinyalin **frekansı**, **fazı** veya **genliği** üzerinde değişimler yapmak gerekiyor. Bu değişimler sayesinde her ne kadar daha fazla veri taşınabilse de bu süreçte sinyalin hedef cihazda doğru anlamlandırılabilmesi için hedefe belirli bir güç seviyesinde ulaşması gerekiyor (Bunun örneği modülasyon teknikleri konusunda verilmiştir). Aksi taktirde verinin iletim sürecinde bozulduğu anlaşılarak paketin drop edilecektir.

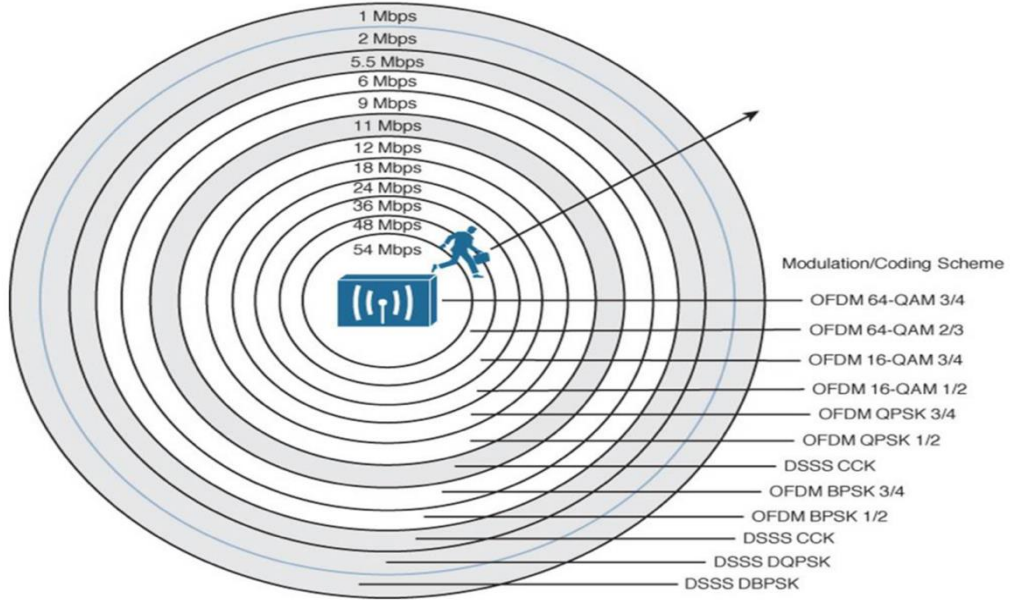
MIMO teknolojisinde sinyallerin hedef cihaza doğrudan ve yansıyarak iletiildiğinden bahsedilmişti. Bu süreçte yansıyan sinyaller de filtrelenerek en temiz kısımları doğrudan ulaştırılan sinyale dahil ediliyor ve bu sayede doğrudan ulaştırılan sinyalin güçlendirilmesi sağlanıyor. Buna **Maximal Ration Combining** deniliyor. Sinyalin güçlendirilmesi aynı zamanda farklı modülasyon tekniklerinin kullanılabilmesini de destekliyor. Bu sayede modüle edilmiş veri hedefe daha güçlü ulaştığı için doğru anlamlandırılarak işleniyor.

Maximal – Ration Combining

AP üzerinden gönderilen yayından alıcıya ulaşan sinyallerinden en güçlü olanını alıp değerlendirmek yerine alıcı kendisine ulaşan her sinyali alıp güçlü kısımlarını kullanarak ana sinyali güçlendirmeyi sağlaya çözümdür. Bu çözüm sayesinde sinyaller alıcı tarafa daha kaliteli ulaştırılmış oluyor.

Dynamic Rate Shifting

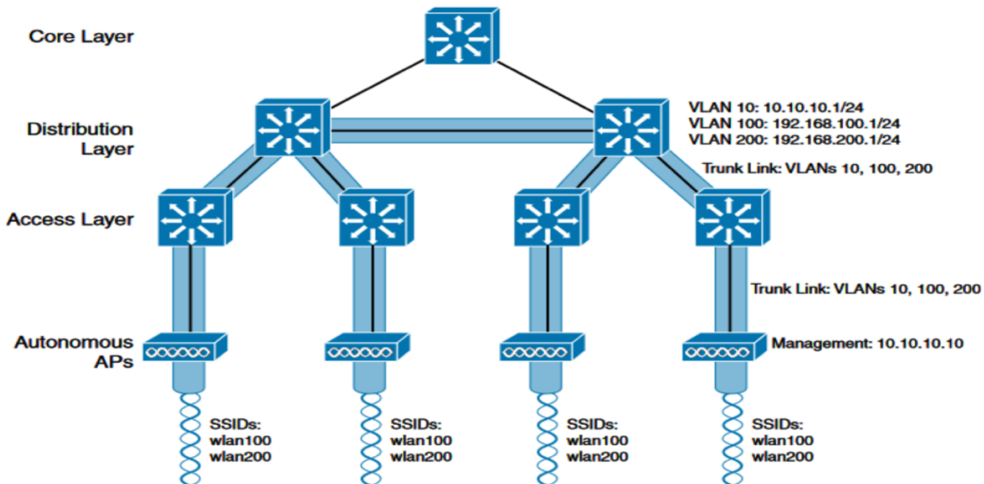
Modülasyon tekniklerinde her ne kadar daha fazla veri taşınsa da daha kaliteli bir altyapıya ihtiyaç duyulduğundan bahsedilmişti. Maximal – Ration Combining çözümü kullanılarak da sinyal kalitesi artırılabilirdi. Bu çözüm sayesinde sinyal kalitesi belirlenerek modülasyon tekniğinin değiştirilmesine Dynamic Rate Shifting denilmektedir. Aşağıdaki görselde de anlaşılacağı gibi alıcının AP 'e mesafesi arttıkça modülasyon tekniği değiştirilerek kullanıcının bağlantı hızı düşürülerek daha akıcı veri trafiği elde etmesi sağlanıyor.



Wireless LAN Topologies

Kablosuz LAN topolojileri için **Autonomous** ve **Leightweight** olmak üzere iki farklı topoloji bulunmaktadır. Bunlara bakıldığında;

Autonomous, kablosuz yayında yönetim sürecinin tamamını kendisi gerçekleştiren topolojidir. Ev kullanıcıları gibi az sayıda AP kullanılan ortamlarda tercih ediliyor.



- Görselden de anlaşılabileceği gibi AP'ler üzerinden farklı VLAN'a ait yayın yapılabiliyor. Autonomous topolojide bunu sağlayabilmek için VLAN'ları ayrı ayrı her switch ve AP üzerinde tanımlanması gerekiyor.
- Bu yapıda AP'ler birbirinden bağımsız çalıştığı için çevresindeki AP'lerle uyum içinde çalışmıyor.
 - o Yayın gücü, kanal seçimi gibi ortamdaki değişikliklere yönelik çeşitli ayarlamaları otomatize gerçekleştiremiyor.
 - o Bir AP'in kapsama alanından çıkılıp aynı yayını yapan farklı bir AP'in kapsama alanına giriş yapıldığında yeniden kimlik denetimine ihtiyaç duyuluyor.
- Autonomous topolojinin avantajlarından biri ise aynı AP üzerinde iki cihaz aralarında haberleşmek istediğinde bu trafik WLC'ye gönderilmediği için (aralarında doğrudan) daha hızlı haberleşiyorlar.
 - o IP telefon gibi bir sistem kullanılmadığı durumlarda aynı AP üzerindeki iki kişinin aralarında haberleşebilmeleri engellenmek istenebiliyor (AP'e bağlanan cihazlar açısından saldırı riski oluşturuyor). Bu gibi durumlarda AP üzerinde ayarlamalar yapılarak (destekliyorsa) engelleme sağlanabiliyor.

- Bu topoloji Lightweight denmesinin nedeni AP'ler üzerindeki yüklerin azaltılmasından kaynaklıdır. Şifreleme ve yayın alma/verme gibi işlemleri AP gerçekleştirirken, yönetimsel bütün süreç ve kararlar WLC üzerinde gerçekleştiriliyor.

- AP birden fazla VLAN için yayın yapıyor olsa da trafikler AP üzerinden itibaren ek bir L3 başlığı eklenerek (aynı zamanda şifreleniyor) tünellendiği için switch üzerinde Management VLAN üzerinden gönderiliyor. Bu nedenle AP'in switch'e bağlı olduğu port Trunk port yerine Access port olarak tanımlanabiliyor (Her türlü VLAN'dan veri alabilmesi için switchlerin WLC bağlı portları ise Trunk bağlanıyor).
 - o Bu durum aynı zamanda her bir switch üzerinde ayrı ayrı VLAN tanımlama, filtreleme gibi tanımlama ihtiyacını ortadan kaldırıyor.
- Bütün AP'ler tak bir WLC üzerinden yönetildiği için AP'ler arası yayın alanlarını belirlemek için yayın gücü otomatik olarak ayarlanabiliyor (Bir AP bozulduğunda diğer AP'ler yayın gücünü arttırarak kapsama alanlarını genişletebiliyorlar). Benzer şekilde kullanıcı bir kez kimlik denetiminden geçirildikten sonra AP değişimlerinde kullanıcının yeniden kimlik bilgileri girmesine gerek kalmadan çok daha az paket trafiği ile kimlik denetimi yapılarak aynı WLC'ye bağlı farklı bir AP'e bağlanması sağlanabiliyor.

- Yedekleme adı altında topolojide iki ayrı WLC (birbirinden bağımsız) kullanılması durumunda bu özellikler kullanılamıyor. Bu özelliklerin kullanılabilmesi için iki WLC'nin de senkronize/bir bütün halde çalışması gerekiyor.
- Arasında senkronize çalışan WLC'ler üzerlerinde tutulan bilgileri gerçek zamanlı olarak aralarında paylaşıyor. Bu nedenle birbirinden bağımsız WLC'lerin kullanıldığı yedekleme yapısında aktif kullanılan WLC'den yedek WLC'ye geçiş sürecinde (AP her 30 saniyede bir WLC'ye gönderdiği Keep Alive paketlerine 30 saniye içinde dönüş alamadığı durumda 3 saniye aralıklarda 4 defa daha Keep Alive paketi gönderiyor. Bu paketlere de yanıt alamadığı durumda yedek WLC'ye geçiş yapıyor) en iyi ihtimalle yaklaşık 40 saniyeden fazla kesinti yaşanırken senkron çalışan WLC yedekleme yapısında geçiş süreci kesintisiz gerçekleşiyor (cihazlar üzerindeki şifrelemeler, konfigürasyonlar, kayıtlar gibi her bilgi gerçek zamanlı olarak paylaşılıyor).
 - AP'lerin WLC'ye gönderdiği Keep Alive paketlerinin Timer süreleri düzenlenebiliyor.
- Lightweight topolojide ilk olarak AP'ler WLC'ye kayıt olur. Daha sonra bütün trafik WLC ile AP arasında oluşturulan CAPWAP tünel üzerinden gerçekleştirilir. Yani AP'e gelen her bir trafik WLC'ye gönderilerek WLC üzerinde belirlenen filtreleme ve kontrol işlemleri gerçekleştirildikten sonra ilgili adrese gönderilir.
 - Dolayısıyla bu süreç gecikmeye neden olacaktır. Gerçek zamanlı haberleşme sürecinde kayıplar yaşanmaması için AP ile WLC arasındaki haberleşmenin (RTT – Round-Trip Time) 100 ms'yi geçmemesi öneriliyor.
- InterVLAN haberleşmesi WLC üzerinden yapılabileceği gibi WLC bir L3 switch'e bağlanarak da gerçekleştirilebilir.
- Bulut tabanlı WLC çözümleri de bulunuyor. Örnek olarak Cisco Meraki verilebilir.
- Lightweight AP topolojisi **Split-MAC Architecture** olarak da biliniyor.

AP Durumları

- 1- **AP Boots**, AP'in işletim sistemi açılırken WLC ip adresini öğrenmek için belirlenen teknik ile (DHCP sunucusundan, DNS sorgusu yaparak, Broadcast yayın yaparak vb.) WLC'nin ip adresini öğrenmeye çalışır. WLC ip adresini öğrenmediği takdirde öğrenene kadar kendisini tekrar tekrar yeniden başlatır.
- 2- **WLC Discovery**, AP WLC'nin ip adresini öğrendikten sonra aralarında haberleşme süreci başlar ve bağlantı kurabilmeleri için aralarında uyumlu olup olmadıkları belirlenir.
- 3- **CAPWAP Tunnel**, AP ve WLC aralarında uyumlu oldukları anlaşıldıktan sonra şifreleme detaylarını aralarında paylaşarak CAPWAP tüneli kurulur.
- 4- **WLC Join**, CAPWAP Join Request ve CAPWAP Join Response paketleriyle AP WLC'ye kendisini kaydettirdiği aşamadır.
- 5- **Download Image**, AP kendisini WLC'e kayıt ettirdikten sonra yapılan ilk işlem AP üzerindeki işletim sisteminin kontrol edilmesidir. WLC üzerinde yönetebileceği işletim sistemlerinin sürümleri bulunuyor. AP'ler kendisini kaydettirdikten sonra eğer ki üzerlerindeki işletim sistemi sürümleri WLC'nin yönetebileceği bir işletim sistemi sürümüne sahip değilse yönetebileceği sürümlerden birini AP'e yükletiyor.

- Bu durum topolojideki aynı marka AP'lerin hepsinin aynı sürüme sahip olmalarını sağlıyor. Aynı zamanda WLC üzerindeki işletim sistemleri Upgrade edildiğinde WLC otomatik olarak topolojideki kendisine bağlı ve aynı marka olan bütün AP'lere bu işletim sistemini yükletiyor.
 - Ek olarak WLC'ler bütün AP'lerin yönetim sürecini üstlendiği için genelde yedeklenmek istenir. Burada dikkat edilmesi gereken noktalardan biriside yedeklenen WLC ile aktif kullanılan WLC arasında farklılıklar bulundurulmamasıdır (Yedek WLC ile aktif kullanılan WLC ayrı ayrı kullanılıyorsa). Örnek olarak WLC'ler arasındaki AP'lere yüklenecek işletim sistemi sürümleri farklı olması durumunda yedek WLC'ye geçiş yapıldığında bütün AP'lerin işletim sistemi yeniden kurulması gerekecektir.
- 6- **Download Config**, kayıt olan yeni AP'in işletim sistemi kontrol edilip uygun sürüme getirildikten sonra AP'lere uygulanan konfigürasyonlar gönderilerek tanımlı özelliklerin ayarlamaları yapılıyor (QoS, RF, SSID vs.).
 - 7- **Run State**, bu adımdan sonra AP aktif olarak hizmet vermeye başlıyor.
 - 8- **Reset**, AP resetlenmek istediğinde veya AP ile WLC arasında bağlantıda bir kesinti yaşanması durumunda süreç başa dönerek tekrarlanmaktadır.

WLC Keşif Yöntemleri

AP'lerin network üzerinde WLC keşfedebilmesi için öncelikle ip adreslerine sahip olması gerekiyor. Ip adresi atandıktan sonra WLC'nin ip adresi tanımlanmış/öğretilmiş ise Unicast yayınlı, öğretilmediği durumda Broadcast yayınlı UDP 5246 portundan CAPWAP Discover Request paketi göndererek WLC keşfi yapıyor. Networke bağlı WLC bulunduğu takdirde Broadcast yayınlı gönderilen paketlere geri dönüş yapacaktır.

- AP'lere manuel olarak üç farklı WLC'nin ip adresi tanımlanabiliyor (Bu adresler NVRAM'e kaydediliyor). Bu tanımlama sonrasında AP her açılışında sırasıyla manuel tanımlanan ip adreslerini deniyor. Manuel tanımlı ip adresleriyle WLC'ye ulaşamadığı takdirde Broadcast yayınlı ile aramaya başlıyor.
- DHCP protokolünde Option 43 kaydı kullanılarak da AP'lere WLC'nin ip adresi öğretilabiliyor (Option tanımı için CCNA - 2.07 - DHCPv4 konusunu inceleyebilirsin – Farklı marka cihazlarda Option kodu farklılık gösterebilir). Ek olarak DNS protokolü üzerinden de WLC'nin ip adresi öğretilabiliyor. Hiçbir şekilde de WLC'ye bağlantı kuramadığı takdirde AP kendini yeniden başlatır.
- WLC ile AP'ler farklı networklerde veya farklı VLAN'lara dahil olabilir. Bu durumda normal şartlar altında AP'ler broadcast yayınlı kullanarak WLC'ye bağlantı kuramazlar. Bağlantı kurabilmeleri için DHCP protokolünde de kullanıldığı gibi broadcast paketlerini dinlemesi istenen arayüze giriş yapılarak (fiziksel arayüze veya VLAN arayüzüne) "**ip helper-address <WLC Address>**" komutuyla broadcast yayınlı networke bırakılan paketlerin dinlenmesi ve Unicast yayına dönüştürülerek WLC'nin bulunduğu networke taşınması sağlanıyor. Varsayılanda "**ip helper-address**" komutuyla DHCP paketleri dinlemeye alındığı için UDP 67 ve UDP 68 portlarına gönderilen paketler dinlemeye alınacaktır. Bunu portlara ek olarak WLC Discover paketlerinin de dinlemeye alınması için global konfigürasyon modunda "**ip forward-protocol udp 5246**" komutunun kullanılması gerekiyor.

```
R1(config)#ip forward-protocol udp 5246  
R1(config)#int gi 0/0/0  
R1(config-if)#ip helper-address <WLC MGMT Address>
```

SORU : Router üzerinde ip adresleri ve dinlenmesi istenen port tanımları birbirinden bağımsız yapıyor. Bu durumda routera gelen Broadcast paketlerinden hangisinin hangi ip adresine (hangisi DHCP sunucusunun ip adresi, hangisi WLC'nin ip adresi?) gönderileceği nasıl anlaşılıyor?

Cevap: Uygulaması yapıldığı zaman cevabını Networking-Works/CCNP - ENCORE/CCNP

- 13 - Wireless Signals and Modulation/Lab dizini altında bulabilirsin.

WLC Seçim Kriterleri

Topolojide yedekleme olması için birden fazla WLC bulundurulabildiğinden bahsedilmişti. Birden fazla WLC bulunması durumunda aktif WLC seçimi için göz önünde bulundurulacak özelliklere bakıldığında;

- AP'ler üzerinde manuel tanımlamalarda Primary, Secondary olarak WLC tanımlamalarında öncelik sırası belirlenebiliyor.
- WLC'ler Broadcast yayımla WLC Discover paketleri kullanılarak öğrenilmek istendiğinde topolojideki her WLC'den yanıt dönecektir. Aktif WLC'nin seçilmesi için WLC'lerden birisi Master seçilebiliyor. Yani WLC 'lerden birisi Master olarak ayarlanıyor. Ayarlama sonrasında Discover paketlerine cevap olarak gönderilen WLC Discover Response paketinin içinde bu bilgiyle gönderilerek Master seçilen WLC'nin seçilmesi sağlanabiliyor.
- WLC'ler arasından herhangi biri Master seçilmediği durumda WLC'lerden gönderilen WLC Discover Response paketi içerisinde WLC'lerin yük durumlarına ilişkin bilgiler (üzerinde kaç tane kayıtlı AP olduğu/yönetildiği) de AP'lere iletiliyor. Yük durumu hafif olan WLC aktif olarak seçilerek kayıt süreci başlatılıyor (WLC üzerinde kayıt edilebilecek AP sayısı sınıra ulaşmışsa yeni kayıt başvuruları reddediliyor).

Cisco AP Modları

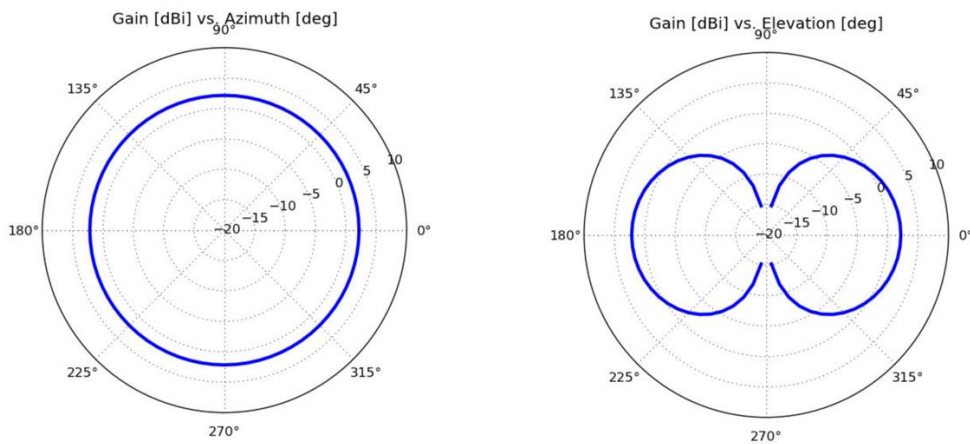
- **Local**, varsayılanda gelen moddur. Bu modda AP, sadece SSID ile yayın yapıp sadece veri trafiğini aktarmaktan sorumludur. Veri aktarımı yapmadığı zamanlarda diğer kendi bulunduğu ve diğer kanallarla interference değerini belirlemek için diğer kanallardaki gürültü seviyesini ölçmek, aynı ortamda kullanılan yabancı AP'leri keşfetmek ve çeşitli saldırı vektörlerini tarayabilmek (IDS) gibi çeşitli işlemler yaptırılabilir.
- **Monitor**, veri trafiği transferi gerçekleştirmez. Sadece çevredeki yabancı AP'lerin taranması, saldırı vektörlerinin kontrol edilmesi (IDS) gibi işlemleri gerçekleştirdiği moddur.
- **FlexConnect**, normalde AP ile WLC arasındaki bağlantıda kesildiğinde AP'ler hiçbir işlem yapamaz hale gelirler. Böyle bir kesinti yaşanması durumunda dahi AP'lerin en azından veri trafiğini taşıyabilir durumda kalmasının sağlandığı moddur (Bu süreçte WLC ile yönetilen hiçbir mekanizma çalışmamaktadır).

- **Sniffer**, hava ortamında akan trafiğin tamamını dinleyerek bir kopyasını Network Sniffer yazılımlarına (Wireshark,) gönderilmesinin sağlandığı moddur. (Bir tür Span port görevi görüyor)
- **Rogue Detector**, AP'in hava ortamından öğrendiği MAC adresleriyle kablolu ortamdan öğrendiği MAC adreslerini ilişkilendirerek yabancı cihaz tespiti yapmaktan sorumlu olduğu moddur (Hava ortamında AP'lerin hizmet kesintisine uğratmak isteyen cihazlara yönelik önlem alınıyor).
- **Bridge**, bir AP'den başka bir AP'e veri taşıma işleminde kullanılan moddur.
- **Flex+Bridge**, FlexConnect ve Bridge modların kombine halde kullanıldığı moddur.
- **SE-Connect**, niçerisinde Spectrum Analyzer donanımı bulunan AP'lerde kullanılabilen moddur. Spectrum Analyzer belirli bir frekans aralığındaki bütün yayınları tarayabilmeyi sağlayan donanım bileşenidir. Normalde kablosuz yayını taramak için kullanılan Kismet, InSSIDer gibi yazılımlar sadece 802.11 protokolünde yapılan yayınları tarayabiliyor (yani sadece Wifi yayınlarını). Çevrede ise Bluetooth gibi gürültü oluşturan çeşitli kablosuz protokoller, sinyaller de bulunuyor. Spectrum Analyzer ile gürültü oluşturan bütün sinyaller dinlenip MetaGek Chanalyzer veya Cisco Spectrum Expert gibi yazılımlara gönderilerek analiz edilebilmesi sağlanabiliyor.

AP'lerde Anten Seçimi

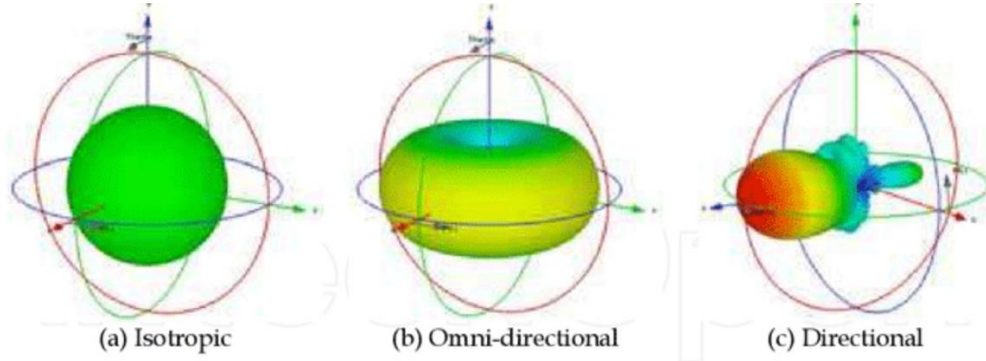
AP'lerin uzak mesafelere yayın yapması istendiğinde kapsama alanına bağlı olarak farklı anten tiplerinin kullanılması gerekebiliyor. Antenlerin yayın şekli aynı zamanda yayın gücünde de değişikliğe neden olmaktadır (Antenlerin gücü Isotropic anten referans alınarak hesaplanır – dBi/Desibel-isotropic). Antenleri seçerken dikkat edilmesi gereken özelliklerine bakıldığında;

- **Radiation Patterns**, her antenin bir sinyal yayılım düzlemi vardır. Bu düzlen yatayda veya düşeyde aynı olmayabiliyor. Bu nedenle anten alırken yatayda ve düşeydeki yayılım düzlemini kontrol ederek almak ve anteni bu doğrultuda konumlandırmak gerekiyor. Yatay düzlemdeki yayılımına Azimuth veya horizontal, düşey eksenindeki yayılımına Vertically veya Elevation denilmektedir.

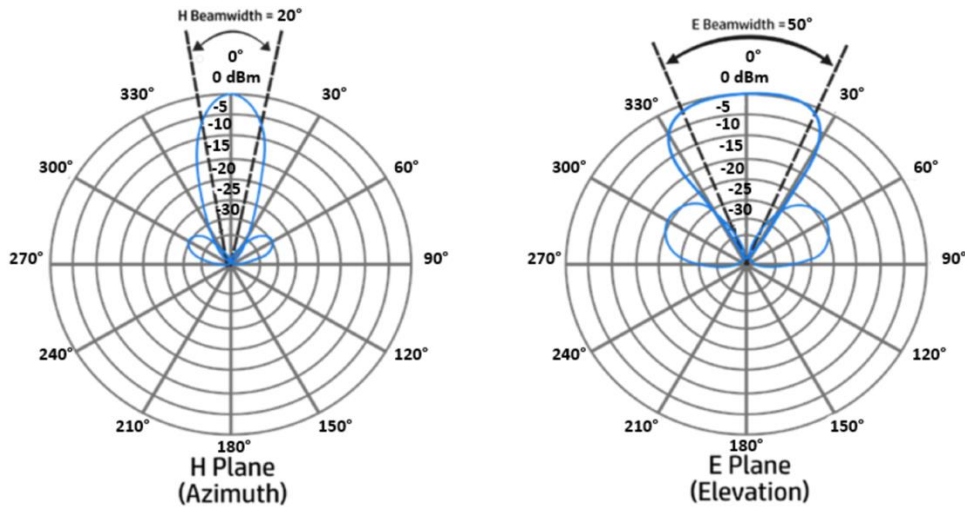


- **Gain**, antenlerin kapsama alanlarına yayın yaparken çevreye yaydığı güç olarak düşünülebilir. Bu değer antenlerin yayılım düzenine göre değişiklik göstermektedir. Yayılım düzlemine göre bakıldığında;

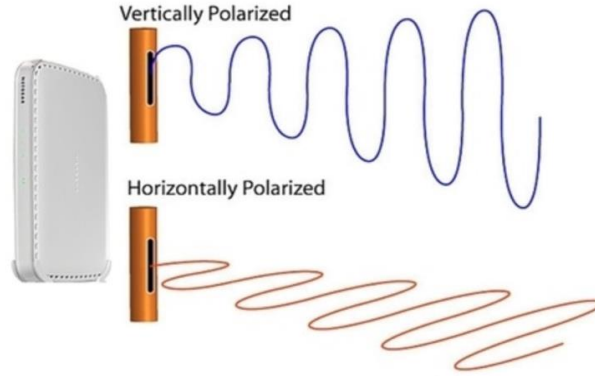
- Isotropic anten, her ekseninde eşit miktarda yayılım sağladığı varsayılan hayali antene verilen isimdir.
- Omnidirectional anten, yatay ekseninde 360 derece yayın yapan antenlere verilen isimdir. Genelde +2 ila +5 dBi aralığında kazanca sahip olurlar (markaya göre değişiklik gösterebilir). Geniş bir alana yayın yapıyor olsa da Directional yayına kıyasla çok daha az kazanca sahiptir.
- Directional anten, belirli bir yön doğrultusunda yayın yapan antenlere verilen isimdir. Genelde 2.4 GHz bandında +6 ile +8 dBi, 5 GHz bandında ise +7 ile +10 dBi arasında kazanca sahiptir (markaya göre değişiklik gösterebilir).



- Beamwidth, antenlerin yayın yaptığı kapsama alanındaki gücünün sıfıra düştüğü yerlerdeki konumlar arasında kalan açıya verilen isimdir. Her ne kadar 50 derecelik açıya sahip olunan Elevation düzleminde daha geniş açıya sahip olduğu için daha geniş alana yayın verebilir olsa da 20 derecelik Azimuth eksenine göre kazancı ve kapsama alanı daha düşüktür.



- Polarization, sinyalin elektriksel alanının titreşim düzlemi olarak tanımlanabilir. Elektromanyetik dalganın vektörel yönünü (vertikal horizontal ya da dairesel) belirtmek için kullanılır. (Detaylı bilgi için <https://webresources.ruckuswireless.com/pdf/wp/wp-wifi-essentials.pdf> adresini ziyaret edebilirsiniz)



NOTLAR

- Radyo dalga boyu görünür ışıkların dalga boyu daha düşük dalga boyuna sahip olduğu için insan sağlığına zararı yoktur.
 - Dalga boyu ile frekans ters orantılıdır. Dalga boyu büyüdükçe frekansı küçülür.
- Kablosuz yayınlar için frekans bantlarının kullanımı konusunda ülkeler kendi standartlarını/regülasyon belirliyor. Bir AP alınacağı zaman kullanılacağı ülkenin regülasyonuna uygun olup olmadığı kontrol edilerek alınmalıdır.
- Frekans bandı üzerinde 12. Ve 13. kanallar kullanılarak yayın yapılması engellenebilir. Nedeni 12. Veya 13. Kanallardan yayın yapıldığında yurt dışından gelen cihazlar bu kanalları desteklemeyebiliyor. Bu durumda yapılan yayını da göremiyorlar/bağlanamıyorlar.
- Miliwatt ve desibel arasındaki ilişkiye bakıldığında iki desibel değeri arasındaki fark 3 desibel ise bu durum aralarındaki miliwatt değerinin iki katına denk olduğunu gösteriyor. 10 desibel fark ise miliwatt değerinin 10 katı fazla olduğunu ve benzer şekilde eklenen her 10 desibel farkın 10 katına denk geldiği aşağıdaki görselde görülmektedir (Her 10 dBi yayın gücünü 10 kat artırıyor da denilebilir). Özetle;

decibel conversions			
x factor	+ factor	x factor	+ factor
1 000 000 000	+90	0.000 000 001	-90
100 000 000	+80	0.000 000 01	-80
10 000 000	+70	0.000 000 1	-70
1 000 000	+60	0.000 001	-60
100 000	+50	0.000 01	-50
10 000	+40	0.000 1	-40
1 000	+30	0.001	-30
100	+20	0.01	-20
10	+10	0.1	-10
4	+6	0.25	-6
2	+3	0.5	-3
1	0		

- Hava ortamında sinyalin iletimi süresince zayıflama miktarı aşağıdaki formül ile hesaplanabilmektedir.

$$dB = 10 \log_{10} \left(\frac{0.000031623 \text{ mW}}{100 \text{ mW}} \right) = -65 \text{ dB}$$

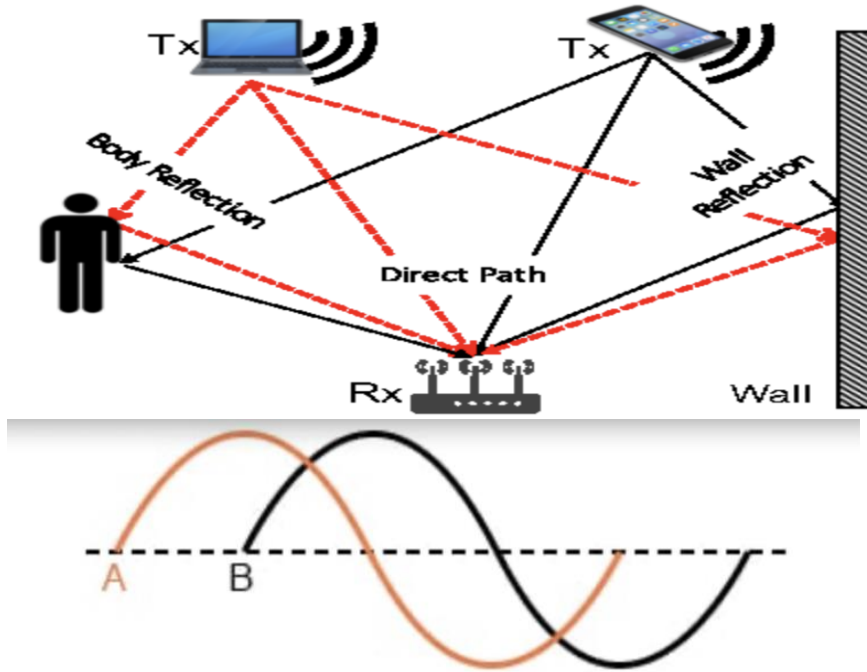
- Kablosuz yayınlar hava ortamında zayıflayabildiği gibi kablo üzerine aktarıldığında da zayıflıyor.
- Aynı kanaldan yayın yapan ve yayın gücü de hizmet alınan yayınlara aynı veya daha yüksek bir başka yayın kaynağı bulunuyorsa, hizmet alınan yayın kaynağı farklı bir kanala taşınarak yayın kalitesi artırılabilir (5Ghz bandında 2.4 Ghz bandına kıyasla çok daha fazla kanal bulunduğunu unutma).
- 802.11ax standardı Wifi 6 olarak da biliniyor. Normalde bir AP sadece bir kullanıcının verisini taşıyabilir (Yani tek bir kablolu hatt kablosuz ortamdaki kullanıcılara paylaştırılıyor gibi düşünülebilir). 802.11ax standardı ile beraber eğer ki boyutları frame boyutunu geçmiyorsa birim zamanda aynı anda birden fazla kullanıcının verisini taşıyabiliyor. Bu doğrultuda kablosuz ortamda yollanabilen tek bir frame boyutu da 9000 baytlara kadar çıkarılabiliyor.
 - Bu işlem AP üzerinde gerçekleşiyor. Yani AP üzerinden yayın yapılırken bu işlem gerçekleşiyor. Upload gibi kullanıcılardan AP'e doğru yayınlarda yine birim zamanda tek kullanıcı verisi taşıyabiliyor/yayın yapıyor.
 - 160 MHz'lik kanal genişliğini desteklemektedir. 160 MHz'lik kanal genişliği kullanıldığı taktirde tek seferde sadece iki yayın basılabiliyor. Bu nedenle günümüzde pek tercih edilmiyor.
- Bilgisayar veya sunucular üzerine kurulabilen WLC yazılımları da mevcut ama donanımsal olmadığı taktirde AP'ler arasında sınırlı işlemler yapıyor (Yayın alanı için güç ayarlaması, uygun kanal seçimi gibi pek çok önemli özellik üzerinde ayarlamalar gerçekleştiriyor).
- Switch içerisine de WLC gömülebiliyor. Buna **Embedded WLC** deniliyor. Bu sayede her ne kadar CAPWAP tüneline daha kısa olmasını (daha az gecikme yaşanıyor) sağlasa da bu durum lisans ücretlerine de yansıtılıyor.
 - Benzer şekilde WLC'ler AP üzerinde de olabiliyor ama harici WLC'ler kadar özellikleri desteklemediği için pek tercih edilmiyor.
- Genelde kullanılan Omnidirectional antenlerin yatayda 360 derece yayın verdiğinden bahsedilmişti. Bu antenler duvar kenarı gibi kıyı köşe yerlere konulduğunda aslında kaliteli yayının yarısından faydalanılamıyor. Cisco AP'lerde yayın düzlemi AP'lerin kurulum içinde tavana yerleştirildiğinde aşağı yönde yayın yapılacak şekilde ayarlanmıştır. Bu sayede istenilen alana daha kaliteli yayın yapılabilmektedir.
- **Parabolic Dish antenler yayını çok fazla güçlendirdiği için önünde durması sakıncalıdır. Sağlık problemlerine neden olabiliyor.**
- Anten türleri hakkında detaylı bilgi için <https://www.elektrikport.com/makale-detay/antenler-ve-cesitleri/16763#ad-image-0> adresini inceleyebilirsiniz.

Terminolojiler

- Anten, kendisine gelen yayını güçlendirerek hava ortamına ileten parçadır.
- Frekans, bir saniyede geçen dalga boyu/cycle sayısıdır. Birimi Hertz'dir.
- Dalga boyu, bir elektromanyetik dalganın bir Cycle/fazını tamamlaması için kat ettiği mesafeye verilen isimdir. Lambda sembolü ile temsil edilir. Frekans ile ters orantılıdır (Dalga boyu = 1/Frekans). Özetle dalga boyu büyüdükçe frekans küçülür. Frekans küçüldükçe yayının kapsama alanı daralır.

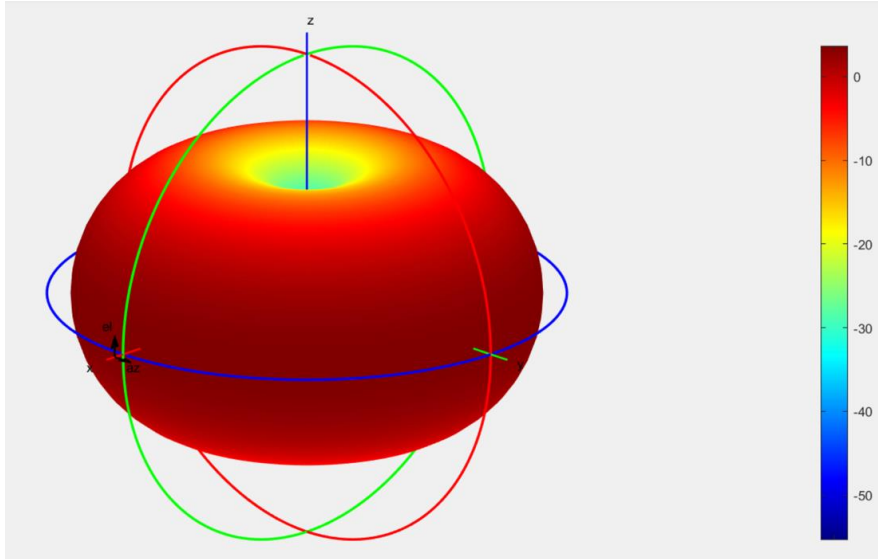


- SNR (Signal-to-Noise Ratio), açılımından da anlaşılacağı üzere istenen bilgi veya bir sinyalin gücü ile istenmeyen sinyal veya arka plan gürültüsünün gücü arasındaki orandır.
- Phase, bir Cycle'ın başlangıcı ve bitişi arasındaki periyoduna verilen isimdir.
- Phase Shifting, verinin fazın kaydırılmasına verilen isimdir. Yapılan yayın hedefe farklı yollar üzerinden (gecikmeli) ulaştığında oluşabiliyor. Bu durumda sinyal doğrudan gelen sinyal kadar güçlüyse doğrudan gelen sinyalin gücünü olumsuz yönde etkileyebilir hatta fazın 180 derece kayması durumunda sinyaller üst üste bineceği için birbirlerini doğrudan söndürebilir.
 - Örnek vermek gerekirse, Kaynaktan çıkan bir yayın sinyali doğrudan hedefe ulaşabildiği gibi bir kısmı da duvardan yansıyarak hedefe daha geç ulaşması örnek verilebilir. Bu durumda hedefte veri bu şekilde algılanıyor.



- FM (Frequency Modulation) Anten, her yöne yayın yapan, alüminyum, çok kazançlı bir antendir.
- AM (Amplitude Modulation) Anten, plastik çubuk etrafına bakır kablo sarılarak oluşturulan antenlerdir. Günümüzde kullanılmamaktadır.

- İsootropic Anten, tüm antenlerin referansıdır. Her ekseninde (yatayda ve düşeyde 360 derecede) eşit miktarda güç hayali bir antendir. Tüm antenlerin gücü bu antenin parametreleri referans olarak hesaplanır.
 - 1 miliwatt ve 360 derece (yatayda ve düşeyde her tarafa yayın yapabilen) yayın yapabilen sanal bir antendir.
- Dipole Anten, yatayda 360 derece yayın verirken düşeyde 45 derecelik yayın veren antenlerdir. Görselden de anlaşılacağı gibi en zayıf yayın dikey yönde verilmektedir. Omnidirectional anten olarak da biliniyor.



- Transmit Beamforming, bir kablosuz iletişim sırasında oluşan gürültü oranını (SNR değerini) iyileştirmek için enerjiyi bir alıcıya odaklanmasını sağlayan tekniktir (Detaylı bilgi için <https://www.mathworks.com/help/wlan/ug/802-11ac-transmit-beamforming.html> ve <https://www.networkworld.com/article/967954/beamforming-explained-how-it-makes-wireless-communication-faster.html> adreslerini inceleyebilirsiniz).