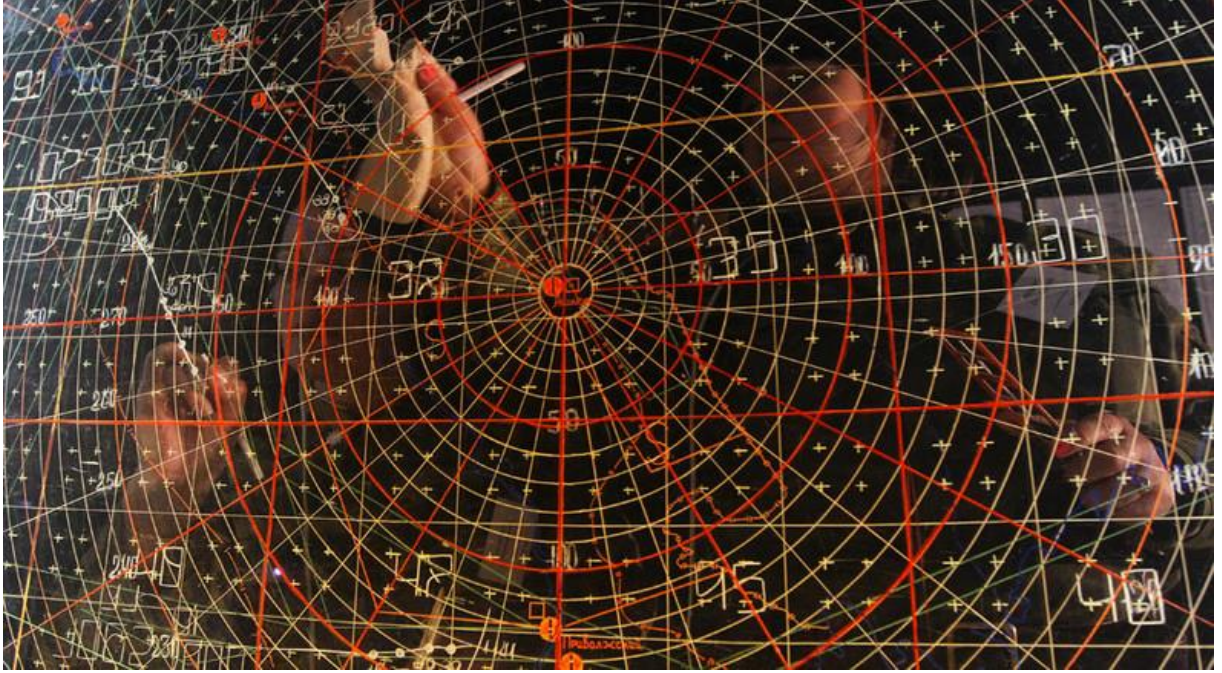


Görünmezliğe Veda

## Artık Hayaletler Görülebilecek

**Rusya Radyofoton Radar Geliştiriyor. Rusya ilave menzil ve hassasiyeti artırmak amacıyla lazer kullanan ve hedefin üç boyutlu (3D) görüntüsünü dahi oluşturabilen hayalet avcısı bir radar sistemi geliştirmektedir.**

Ercan Caner, Sun Savunma Net, 14 Kasım 2018



*Foto: Mikhail Fomichev/RIA Novosti*

### **Radar Nedir?**

Radar terimi İngilizce “Radio Detection and Ranging” kelimelerinden üretilmiş bir kelimedir. Radarlar temel olarak bir objenin yerinin ve mesafesinin belirlenmesinde kullanılan elektromanyetik bir sistemdir.

Bir radar sistemi; genellikle anten vasıtasıyla atmosfere yayınlanan elektromanyetik sinyal üreten bir göndericiden ibarettir. Gönderilen sinyal bir objeye çarptığında birçok yönde yansır veya geri gönderilir. Yansıyan bu eko sinyali radar anteni tarafından alınır, çeşitli işlemlere tabi tutulur ve radar ekranında gösterilir.

Radar ilk olarak 1900’lü yılların başlarında geliştirilmiştir. İlk patenti Alman mühendis Christian Hulsmeyer tarafından alınmıştır. 1904 yılında Avrupa’da sis içindeki

gemilerin tespit edilmesi, 1922 yılında Birleşik Devletler Deniz Kuvvetleri Araştırma Laboratuvarı Potamac Nehrinde tahta bir geminin tespit edilmesini göstermiş ve aynı laboratuvardan mühendisler 1930 yılında basit bir radar sistemiyle bir hava aracını tespit etmeyi başarmışlardır.

İlk olarak İkinci Dünya Savaşında düşman hava araçlarını tespit etmek maksadıyla kullanılan radarlar, günümüzde savunma, havacılık, uzay, uzaktan algılama, trafik, meteoroloji ve tıp gibi yaşamın birçok alanında etkin bir şekilde kullanılmaktadır.

Radarların askeri alanda üç ana uygulama alanı bulunmaktadır. Hava savunma maksatlı olarak hedeflerin tespit ve tanınması ile silah sistemlerinin izlenmekte olan düşman hedeflerine yönlendirilmesi, füze sistemlerinde silahın güdülmesi ve haritalarda düşmanın bulunduğu yerlerin belirlenmesi maksadıyla kullanılmaktadır.

Hava trafik kontrolünde gerçek zamanlı bilgi transferi yapabilen yüksek hızlı radarların kullanılması hava trafiğinin emniyeti açısından önemlidir. Radarlar hava trafik kontrolünde; havaalanı yakınındaki trafiğin kontrolü, gözlem radarları ile hava araçlarının havada ve terminalde pozisyonlarının belirlenmesi, hassas yaklaşma radarları ile özellikle görüşün olmadığı kötü hava şartlarında hava araçlarının yönlendirilmesi ve havaalanı içinde kullanılan yer kontrol radarları ile hava ve kara araçlarının yerlerinin takip edilerek kazaların önlenmesi maksatları ile kullanılmaktadırlar.



*İki Boeing 747 uçağının karıştığı İspanya Adası Tenerife’de gerçekleşen bu kaza, havacılık tarihinde meydana gelen en ölümlü kazadır. Meydanda fazla sayıda uçak bulunmaktadır, görüş şartları düşüktür. Sis nedeniyle taksi yolunu açmak için kalkış yapmak üzere piste yönlendirilen iki uçak birbirini görememektedir. Ve kule operatörü de sis nedeniyle, pist üzerinde birbirlerine doğru ilerlemekte olan iki uçak olduğunun farkında değildir. Meydanda yer radarı olmadığından kule operatörü her iki uçağın da yerlerini pilot raporlarına dayanarak belirleyebilmektedir. Canlandırma: ptjornal.com*

Radarlar kullanılarak hava araçları sürekli olarak izlenmekte, terminal sahasındaki pozisyonları belirlenmekte, olumsuz hava şartlarında yerden yönlendirilerek hava araçlarının inişleri sağlanmakta ve yüzey tarama radarları ile de meydana gelen hava ve kara araçlarının hareketleri sürekli izlenmektedir.

Radarların uçuş emniyeti açısından önemi çok büyüktür. Örnek vermek gerekirse dünyanın en büyük havacılık kazası 27 Mart 1977 tarihinde o zamanki adı Los Rodeos olan Tenerife havaalanında iki yolcu uçağının olumsuz hava şartları nedeniyle yerde, pist üzerinde çarpışması sonucunda meydana gelmiştir. Kalkış esnasında iki yolcu uçağının çarpışması sonrasında 583 kişi hayatını kaybetmiştir. Trajik olayda Hollanda Kraliyet Havayolları ve American PanAm Havayollarına ait iki Boeing 747 modeli yolcu uçağı çarpışmışlardır.



*Uzaktan algılama radar antenleri. Foto: University of Alaska Fairbanks*

Uzaktan algılama radarları hava olaylarının incelenmesi ve denizlerdeki buzların hareketlerinin incelenmesi maksatlarıyla kullanılmaktadır. Kara trafiğinin düzenlenmesinde özellikle araçların hızlarının belirlenmesinde radarlar trafik polislerinin ayrılmaz bir parçası haline gelmiş durumdadır.

Radarlar uzay uygulamalarında uzay araçlarının yönlendirilmesi, gezegenlerin gözlenmesi, uyduların tespit ve takip edilmesi ve meteorların izlenmesi maksatlarıyla etkin bir şekilde kullanılmaktadır.

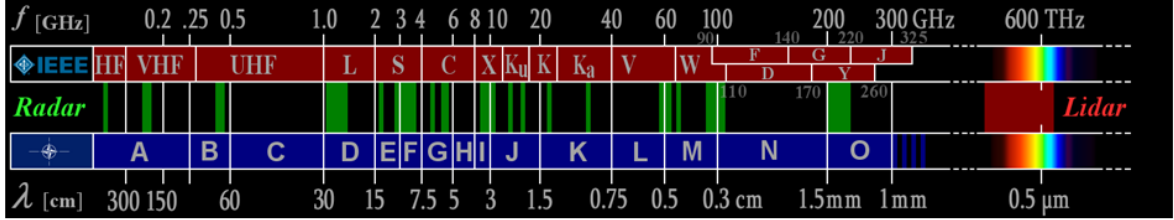
### ***Radarların Çalışma Prensipleri***

Etrafımızdaki objeleri görebilmemizin nedeni, objelerin genellikle güneşten aldıkları ışığı gözlerimize yansıtmasıdır. Gece yürümek istediğinizde nereye gittiğinizi ve önünüzü görmek için bir el feneri kullanabilirsiniz. El fenerinden çıkan ışık demeti önünüzde bulunan nesnelere çarparak geri, gözlerinizin içine yansır. Beyin anında o nesnenin size olan mesafesini hesaplar. Radarlar da çoğunlukla aynı şekilde çalışmaktadır. Radar terimi İngilizce “Radio Detection and Ranging” kelimelerinin kısaltmasından oluşmaktadır.

Bir radarın çalışması için radyo dalgalarını oluşturan, oluşturulan elektromanyetik dalgaları atmosfere gönderen, hedeflerden yansıyan dalgaları geri alan ve bunları

operatörün kolaylıkla anlayabilmesini sağlayan bir gösterge sistemine gereksinim duyulmaktadır. Radarın en basit çalışma prensibi:

- Radar bir elektromanyetik darbe gönderir,
- Radar sonra dinleme moduna geçer,
- Darbe hedef tarafından alınır,
- Radar yayınlanan darbenin hedeften yansıyan ekolarını alır.



Radarlar tarafından kullanılan dalga boyu ve frekans aralıkları. Kod harfleri İkinci Dünya Savaşı esnasında güvenlik nedenleri ile kullanılmış ve o zamandan itibaren radar mühendisleri tarafından yaygın şekilde benimsenmiştir. Grafik: Radartutorial.

### Radarların Fonksiyonları

- Hedeflerin mesafelerinin belirlenmesi – Darbe gecikmesinden,
- Hedeflerin hızlarının belirlenmesi – Doppler frekans kaymasından,
- Hedeflerin yönlerinin belirlenmesi – Hedeften yansıyan dalganın antene geliş yönünden,
- Hedeflerin büyüklüğünün belirlenmesi – Eko sinyalinin büyüklüğünden,
- Hedeflerin şekillerinin belirlenmesi – İstikamet fonksiyonu olarak ekodan,
- Hedeflerin hareket eden parçaları – Ekonun modülasyonundan,
- Hedeflerin malzeme kompozisyonu.

Doppler frekans kayması; radar ile hedef arasında göreceli bir hareket olduğunda meydana gelir, yani radardan gönderilen dalganın frekansı ile hedeften yansıyarak geri dönen dalganın frekansı arasında bir fark oluşur. Bu olaya Doppler Etkisi adı verilmektedir. Doppler frekansı sinyalin gidiş dönüş mesafesindeki değişimin dalga boyuna oranı ile hesaplanır.

Radar tarafından kullanılan radyo dalgalarını üreten cihaza magnetron (yüksek frekanslı salınımlar üreten ve genellikle radarlarda ihtiyaç duyulan yüksek darbe gücünü elde etmekte kullanılan vakumlu bir tüptür) adı verilmektedir.

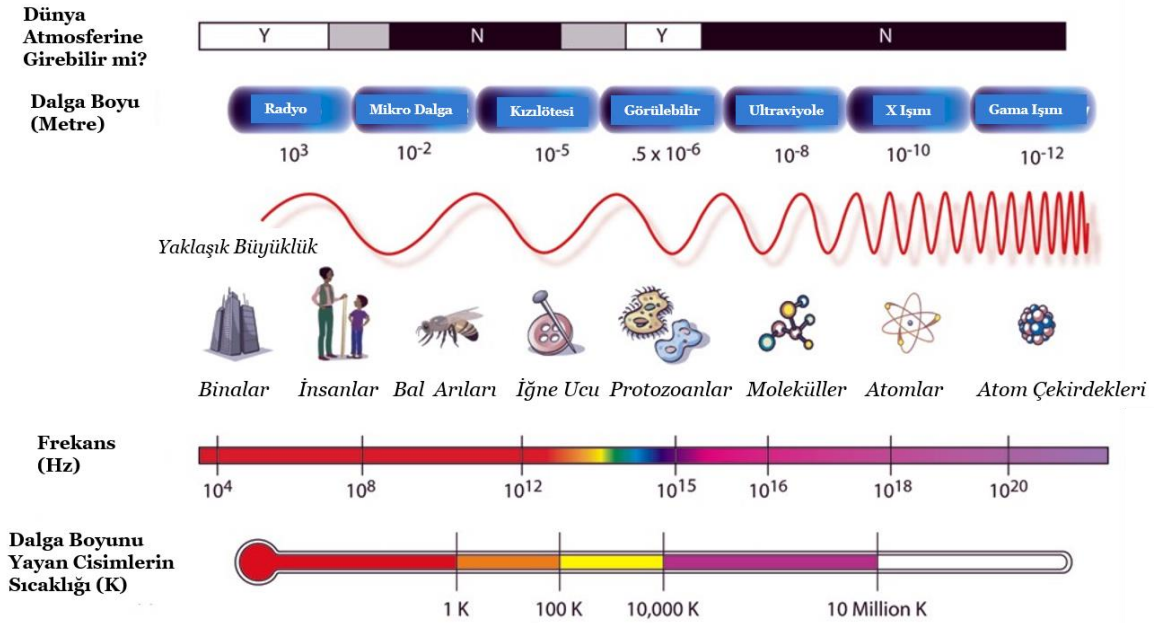
Radyo ve ışık dalgalarının ikisi de elektromanyetik dalgadır, aralarındaki temel fark ise frekanslarıdır. Radyo dalgaları elektronların bir radyo anteninde hızlandırılması ile oluşturulurlar, ışık dalgaları ise atomların içindeki elektronların osilasyonu ile oluşturulmaktadır.

Frekans Bandı	Frekans Aralığı (GHz)	Dalga Boyu Aralığı (cm)
L Bandı	1-2	15-30
S Bandı	2-4	7.7-15
C Bandı	4-8	3.75-7.5
X Bandı	8-12	2.5-3.75
Ku Bandı	12-18	1.67-2.5
K Bandı	18-27	1.11-1.67
Ka Bandı	27-40	0.75-1.11
V Bandı	40-75	0.4-0.75
W Bandı	75-110	0.27-0.4

*Genel olarak kabul edilen frekans radar bantları.*

Radyo dalgaları ışık dalgalarına benzemekte ve aynı hızda hareket etmektedirler, fakat radyo dalgaları görülebilir ışık dalgalarına nazaran çok daha uzun dalga boyu ve düşük frekansa sahiptirler. Radyo ve görülebilir ışık dalgalarının elektromanyetik spektrumdaki yeri aşağıdaki grafikte görülmektedir.

## ELEKTROMANYETİK SPEKTRUM



*Bütün elektromanyetik spektrum görülebilir ışıktan çok daha fazlasıdır ve insan gözünün göremeyeceği enerji dalga boylarını içine alır. Grafik NASA, Düzenleyen Sun Savunma Net*

Radyo dalgaları oluşturulduğunda, anten adı verilen bir verici tarafından uzaya gönderilir, bu radyo dalgaları ışık hızında ( $2,99792 \times 10^8$  m/s) bir objeye, örneğin düşman uçağına çarpmana kadar ilerler. Ve sonrasında objeye çarparak yine aynı hızla radar antenine geri dönerler. Gönderilen dalganın yansiyarak geri dönmesi için gereken süre bilgisayar tarafından hesaplanarak hedefe olan mesafe tespit edilir.



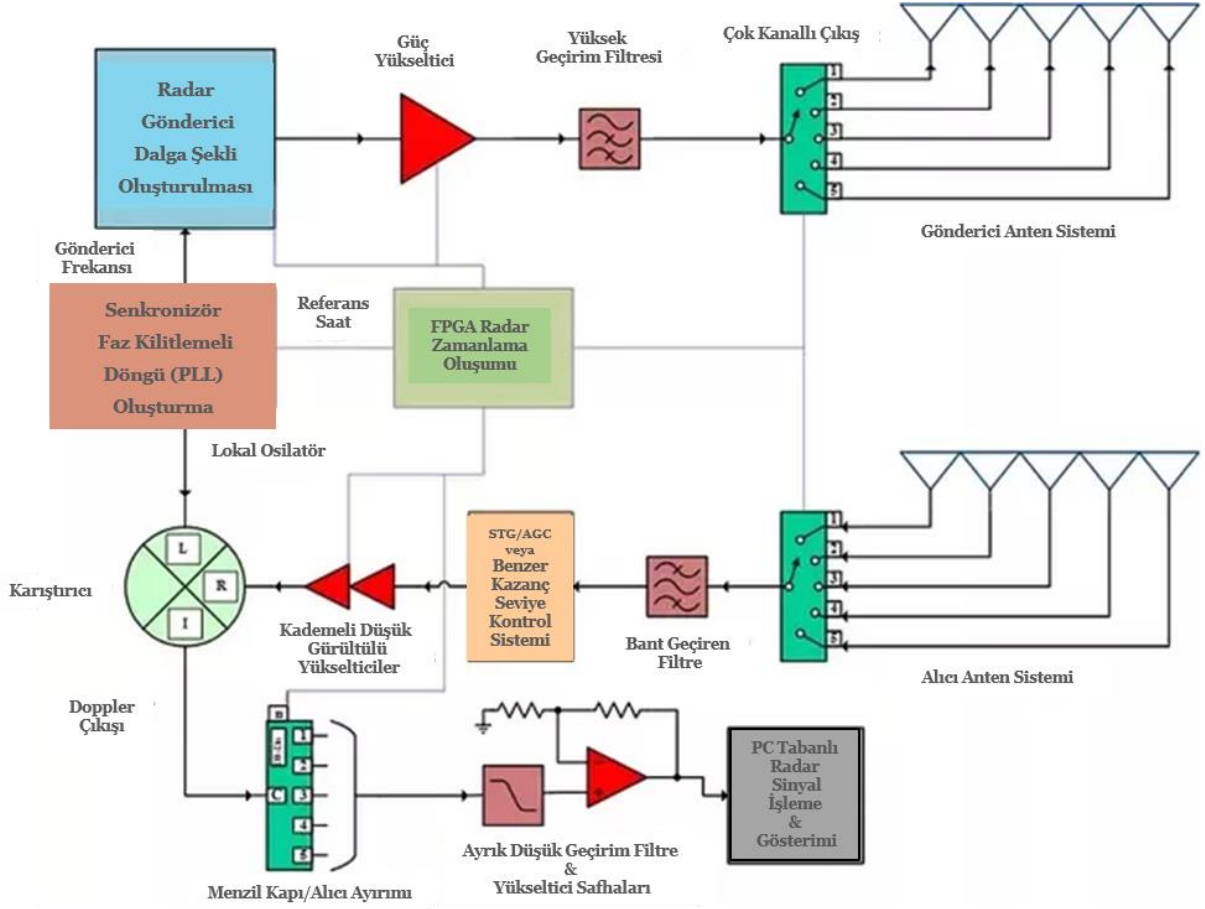
*Konvansiyonel askeri bir radar sistemi. Foto: World of Buzz*

Radar üzerinde kullanılan anten hem verici hem de alıcı olarak çalışmaktadır. Tipik olarak, radyo dalgalarını saniyenin birkaç bini kadar bir sürede gönderir, yansımaları tekrar gönderme yapmadan önce bekler ve yine gönderme yapar. Radar anteni tarafından alınan, hedeften yansıyan radyo dalgaları, onları işleme tabi tutarak, televizyon ekranı gibi bir cihaz olan radar ekranında anlamlı görüntülere dönüştüren elektronik cihazlara gönderilir. Alıcıdaki elektronik bileşenler alınan sinyalleri yükseltir, radyo frekans (RF) sinyali ara frekansa (IF-Intermediate Frequency) dönüştürülür. Radar alıcı donanımı, binalar, yer ve başka objelerden yansıyan dalgaları filtre ederek radar ekranı üzerinde sadece arzu edilen objelerin görülmesini sağlarlar.

### ***CHIRP – Sıkıştırılmış Yüksek Yoğunluklu Radar Darbe Yöntemi***

Radarlarda hem uzun tespit mesafesi hem de iyi bir mesafe çözünürlüğü birbiriyle çatışan iki parametredir. Her ikisini de aynı anda sağlayabilmek maksadıyla kısa darbelerin çok çok yüksek güçle gönderilmesi gerekmektedir. Hedef tespit mesafesi ve hedef görüntüsünün çözünürlüğünü artırmak maksadıyla “CHIRP” olarak adlandırılan ve konvansiyonel radarlara nazaran daha az tepe giriş gücü kullanılan, dalganın sıkıştırılması yöntemi kullanılmaktadır. Konvansiyonel darbeli radara matematiksel teknikler uygulanarak, daha az tepe giriş gücü kullanılarak radarın menzil ve çözünürlüğü aynı anda artırılmaktadır. Sağlanan avantajlardan bir tanesi de radarın düşman unsurlar tarafından tespit edilmesinin oldukça zorlaştırılmasıdır. CHIRP yöntemiyle çok yüksek güç voltaj gereksinimi de azaltılabilir. Radarın

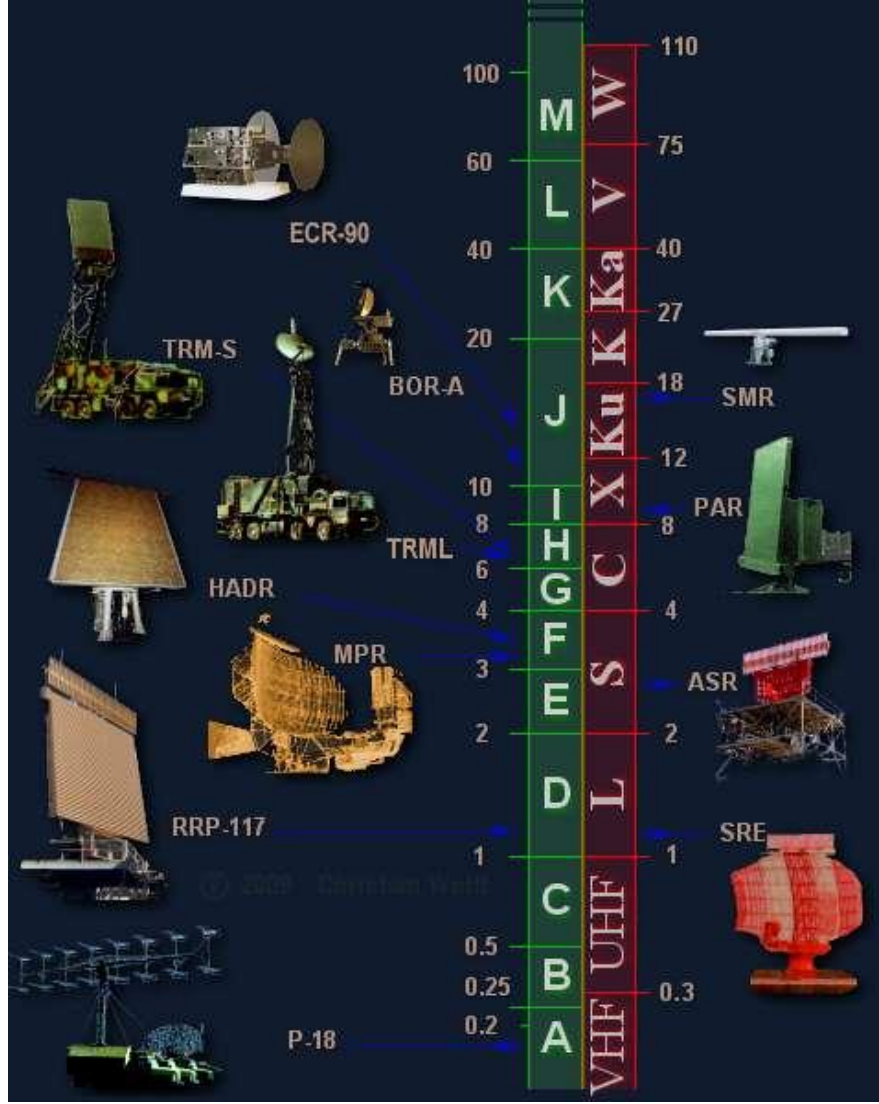
çözünürlüğü yayınlanan darbenin bant genişliğine bağlıdır. CHIRP terimi (Compressed High Intensity Radar Pulse - Sıkıştırılmış Yüksek Yoğunluklu Radar Darbesi), İngilizce lisanında ayrıca kuş civıltısı anlamına da gelmektedir.



*Tipik bir konvansiyonel radarın şematik diyagramı. Diyagram: Quora aracılığı ile Sun Savunma Net*

Radarlarda elektromanyetik dalgaların sabit hızla yayılma özelliği kullanılır. Konvansiyonel bir darbeli radarda; dar ve yüksek voltajlı darbe, sabit bir mikrodalga frekansında salınım yapan bir magnetrona gönderilir. Radarlarda mikrodalgaların kullanılma nedeni; iyi yönlendirme özellikleri olan, fiziksek olarak küçük antenlerin sadece çok yüksek frekanslarda elde edilebilmesidir. Konvansiyonel radar bu mikrodalga darbeyi önce gönderir, sonra bir alıcı anten ve detektör vasıtasıyla hedef ekoları izlenir ve hedeften dönen ve taraması gönderilen darbe ile senkronize edilen yansımalar bir katot ışınlu tüpte gösterilirler.

Hedeften yansıyan bir ekonun alıcıya geri dönmesi için gereken süre, radarla hedef arasındaki mesafeyle direkt orantılıdır. Radar darbesi ışık hızıyla veya kabaca bir mikro saniyede 1000 feet hızla hareket etmektedir. Gönderilen sinyal hedefe gidiş ve dönüş yaptığından her bir mikro saniyelik gecikme radar-hedef arasında 500 feet mesafe anlamına gelmektedir. Bu süreç sürekli olarak tekrarlanarak hedeflerin sürekli görüntüsü elde edilmektedir.



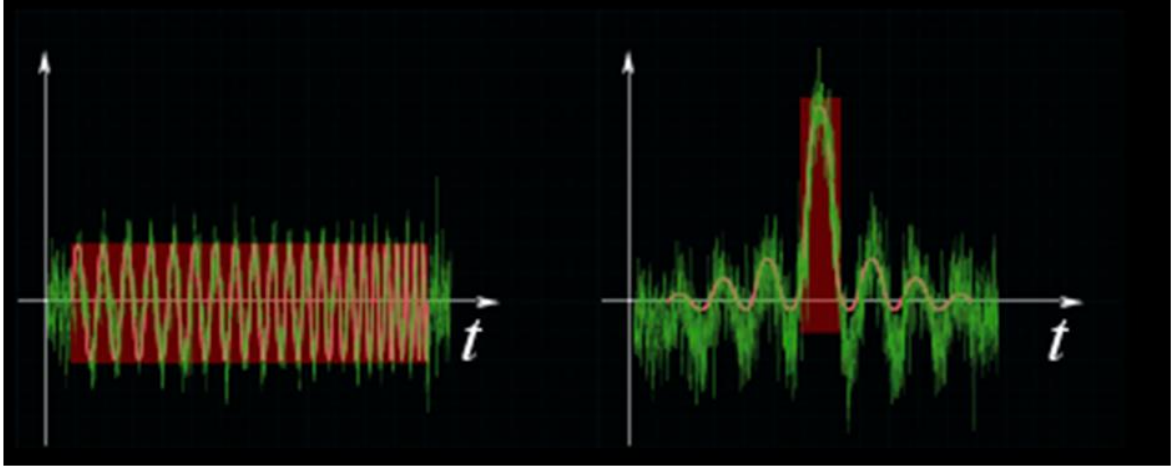
*Bazı radar tipleri ve kullandıkları frekans bantları. İllüstrasyon: Radartutorial.*

Hedef ne kadar büyük olursa o kadar büyük enerji yansıtacak ve radar ekranında daha parlak görülecektir. Doppler etkisine dayanarak sinyalin daha fazla işleme tabi tutulması da hedefin sabit veya hareketli olup olmadığı ve hareket ediyor ise hangi yönde ve hangi hızla hareket ettiğini gösterecektir.

Bir radarın etkili menzili, güvenilir ekoların dönmesinin beklendiği azami hedef mesafesi olarak tanımlanırken, çözünürlük de birbirlerine yakın konumdaki iki ayrı hedeften hâlâ iki ayrı eko dönüşü sağlayabilme kabiliyeti olarak tanımlanmaktadır.

Radaranın menzili, gönderilen radyo frekans enerjisinin miktarı ile belirlenir. Bu, darbe yüksekliğinin (gücü), darbe genişliği (zaman) ile çarpılması ile bulunur ( $Güç \times Zaman = Enerji$ ). Bu gönderilen darbenin alanına eşittir. Radaranın menzili hem radar hem de hedef enerjisi karesel olarak yaydıklarından, gönderilen enerjinin dördüncü dereceden köküyle orantılıdır. Bir radarın menziline iki katına çıkarabilmek için yayılan enerji bu nedenle 16 kat artırılmak zorundadır.





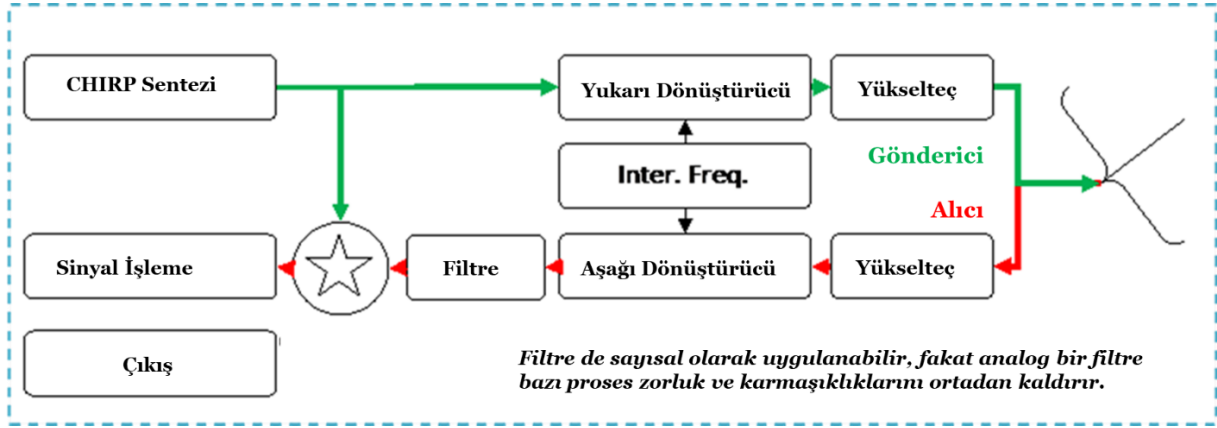
*Darbe sıkıştırma safhasının giriş ve çıkış sinyalleri, alınan sinyal gürültüsü fark edilmeyecek kadar küçüktür, bu nedenle darbe sıkıştırma açık bir eko sinyal alınmasını sağlar. Diyagram: Radartutorial.eu aracılığı ile Sun Savunma Net*

Radarin çözünürlüğü ise sadece gönderici darbe genişliği ile belirlenmektedir. Darbe genişliğinden daha az ayrımı olan iki hedef olması durumunda; gönderilen sinyalin sonunun yakın hedeften yansıması, uzaktaki hedeften yansıyan sinyalin başlangıç zamanıyla aynı anda gerçekleştiğinden, radar ekranı üzerinde tek bir görüntü olacaktır.

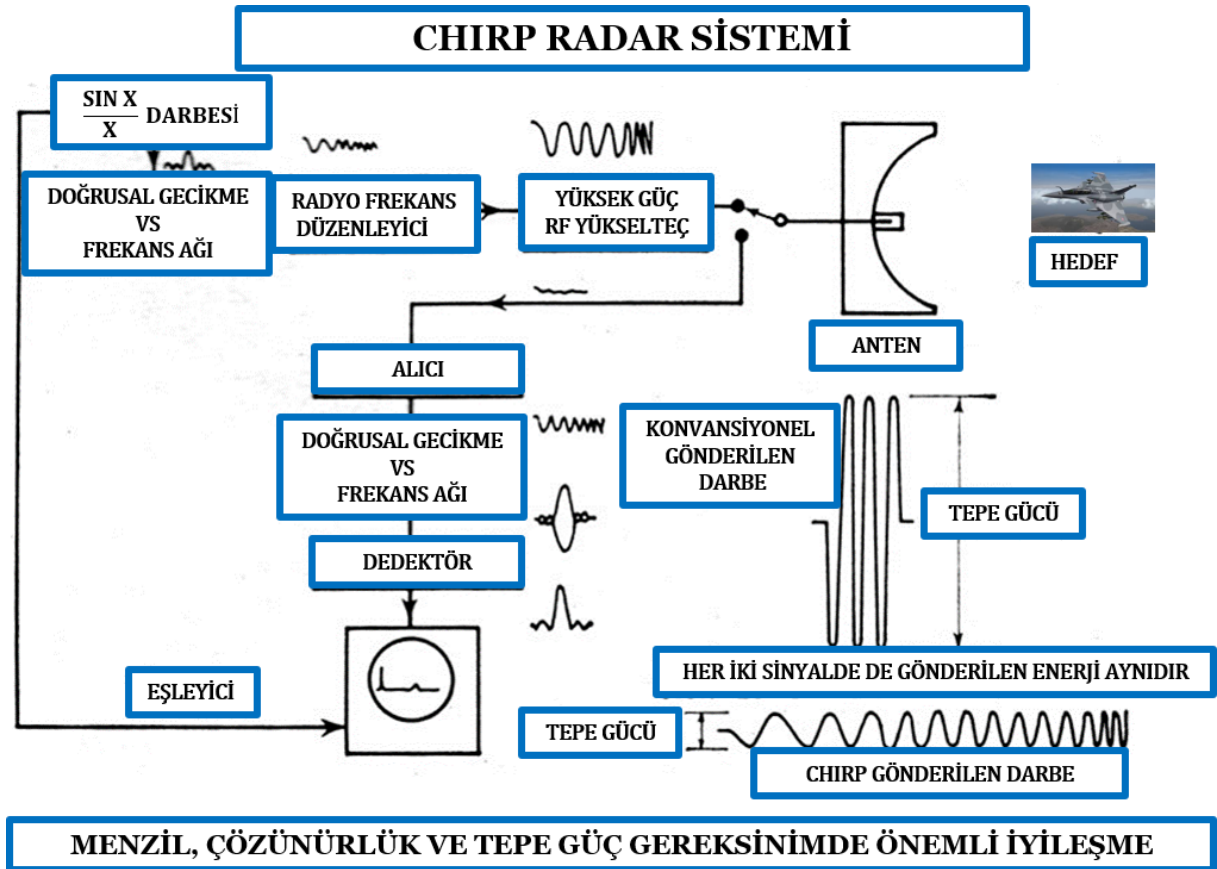
Menzil ve birbirine yakın hedefin birbirinden ayırt edilebilme parametresi olan çözünürlük bu nedenle birbirlerine zıt olan iki radar gereksinimidir. Çözünürlük elde etmek için, gönderilen sinyal darbesi mümkün olabildiğince dar olmak, menzil elde edebilmek için ise gönderilen sinyalin alanı mümkün olabildiğince büyük olmak zorundadır. Bu iki gereksinimin bir araya getirildiğinde çok dar, aşırı yüksek güçte radyo frekans darbeleri gerekmektedir.

İşte burada devreye sistem ve komponent kabiliyetleri girmektedir. Gönderici tüplerinden, bazen birkaç megawatt büyüklüğü gücünde çok kısa darbeler sağlanması beklenir. Çok kısa darbelerde kullanılan dar görev döngüleri etkisizdirler. Hava aracı uygulamalarında, arklama problemi nedeniyle söz konusu olan azami voltaj güç limiti mevcuttur. 40 kV değerinden daha büyük voltajlar oldukça problemlidir. Yüksek akımlı gönderici tüpleri kullanılabilir, fakat burada da bir limit söz konusudur. Tüplerin rezonans boşlukları, mikro dalga üreteceklerse küçük ebatla olmak zorundadırlar, tüp yapısını eritmemek için oluşan azami akım sıcaklığının da bir limiti bulunmaktadır.

CHIRP (Compressed High Intensity Radar Pulse - Sıkıştırılmış Yüksek Yoğunluklu Radar Darbesi) yöntemini açıklayabilmek için, tek bir frekans darbesi gönderme yerine, radarın bütün bir sinyal olarak yayınlanan, dört ayrı frekans darbesi gönderdiğini göz önüne alalım. Her bir frekans yayını için gereken zaman uzunluğu birbirleri ile aynıdır.



Alıcı, hedeften yansıyan  $f_1$ ,  $f_2$ ,  $f_3$  ve  $f_4$  frekanslarını almak için dört ayrı filtre ve detektör kullanmaktadır. Dört detektörün çıkışları, zaman olarak bir bütün oluşturmaları için zaman gecikmelerine tabi tutulurlar. Yani  $f_1$  3T mikro saniye,  $f_2$  2T mikro saniye,  $f_3$  T mikro saniye geciktirilirken  $f_4$  ise geciktirilmemektedir. Toplanan çıkış darbe genişliği 4T saniyedir. Gönderilen ilk darbe 4T mikro saniye uzunluğunda olduğundan çözünürlük, gönderici enerjisi düşürülmeden dört kat artırılmaktadır.



CHIRP Radar sistemi, eşit menzil ve hedef çözünürlüğü için darbeli bir radara nazaran çok daha az güce gereksinim duymaktadır. Devre Şeması: RF Cafe

Çözünürlük, sadece T mikro saniye genişliğinde her bir detektör tarafından alınan sinyalle belirlendiğinden, konvansiyonel bir radarda dönüş darbesi 4T mikro saniye genişliğinde olmak zorundadır.

Bu 4.1 oranındaki geliştirme daha yüksek çözünürlük anlamına gelmemektedir. Yayılan enerjide 4:1 oranındaki yükselme çözünürlükte bir gelişme olmadan menzilin artması demektir. Dördüncü dereceden kök kuralına göre bu, radarın menzilin 1.20 faktörü oranında artıracaktır. Ya da konvansiyonel menzil ve çözünürlük yeterli olduğunda, dört-frekans modülasyon tekniği, güç sistemlerini büyük ölçüde basitleştirerek tepe güç gereksinimini dörde bir oranında azaltacaktır.

Daha fazla frekans kullanıldıkça ve her bir frekans için harcanan zaman azaldıkça elde edilen sonuçlar daha iyi olacaktır. Daha fazla frekans limiti doğrusal taranmış sinyaldir. Alıcıda gereken gecikme bu nedenle, frekans cihazına karşı doğrusal olarak artan gecikmedir. CHIRP (Compressed High Intensity Radar Pulse - Sıkıştırılmış Yüksek Yoğunluklu Radar Darbesi) radar teknolojisinin temeli budur.

Bir CHIRP radarı taranmış frekans sinyali gönderen, hedeften yansıyan bu sinyali geri alan ve sinyali, kısa ve yoğun bir dönüş sinyali haline getirecek şekilde zaman gecikmesine tabi tutan bir radardır. Taranan sinyale CHIRP Sinyali adı verilmektedir. Son dar darbe DE-CHIRPED-COLLAPSED-COMPRESSED (sıkıştırılmış yüksek yoğunluklu radar darbesinin gerilerek eski haline döndürülmesi) sinyal olarak adlandırılmaktadır. Bir CHIRP radar sistemi, eşit menzil ve hedef çözünürlüğü elde etmek için konvansiyonel darbeleri nazaran çok daha az güce gereksinim duymaktadır.

### ***Görünmezlik Teknolojisi***

Görünmezlik teknolojisinin hedefi hava araçlarını radarlara görünmez yapmaktır. Görünmezlik için iki yöntem bulunmaktadır:

- Hava aracı şeklini, yansıttığı radar sinyallerini radardan farklı bir yere yansıtacak şekilde tasarlamak,
- Hava aracının gövdesini radar sinyallerini soğuracak maddelerle kaplamak.

Hava araçları aerodinamik özellikleri nedeniyle kıvrımlı yüzeylere sahiptir ve bu da onları radarlara karşı oldukça hassas bir hale getirmektedir. Kıvrımlı yüzeylerin anlamı, radar sinyalleri hava aracının neresine çarparsa çarpsın bir kısmının radar alıcı antenine geri döneceği anlamına gelmektedir.

Görünmezlik özelliğine sahip hava aracı yüzlerinin tamamına yakınının düz yüzeyler ve çok keskin kenarlardan oluşmasının nedeni budur. Hava aracı şekline ilave olarak gövde radar enerjisini soğuran maddelerle kaplanmaktadır. Sonuç; F-117 gibi büyük bir hava aracının radar ekranında bir serçe kuşu ebatlarında görünmesidir. Bir hava aracına görünmezlik özelliğinin kazandırılması maksadıyla, kolektif olarak radar

yansımaya/emisyonu, kızıl ötesi, görülebilir ışık, radyo frekans (RF) spektrumu ve işitsel imzasını azaltan teknolojiler birlikte kullanılmaktadır.

Hedef	Doğrusal Skalada Radar Kesit Alanı	Log Skalada Radar Kesit Alanı
Kuş	$0.001 m^2$	$-30 dB m^2$
Seyir Füzesi	$0.01 m^2$	$-20 dB m^2$
İnsan, Küçük Bot, Küçük Hava Aracı	$1 m^2$	$0 dB m^2$
Savaş Jeti, Bombardıman Uçağı	$10 m^2$	$10 dB m^2$
Büyük Hava Aracı	$100 m^2$	$20 dB$
Tanker, Büyük Yolcu Gemisi	$1000 m^2$	$30 dB m^2$



*Hava Aracı Yüzeyleri: Düz ve çok keskin kenarlar, hava aracı üzerinden yansıyan sinyallerin radardan başka yönlere doğru yönlendirilmesini sağlarlar.*

*RAM – Radar Emici Maddeler: Hava aracının yüzeyini kaplamakta kullanılan polimer esaslı maddeler, elektro manyetik radar dalgalarını ısıya dönüştürerek yansımaya sinyalini bloke eder ve hava aracının radarlar tarafından tespit edilmesini güçleştirmek için radar imzasını azaltırlar.*

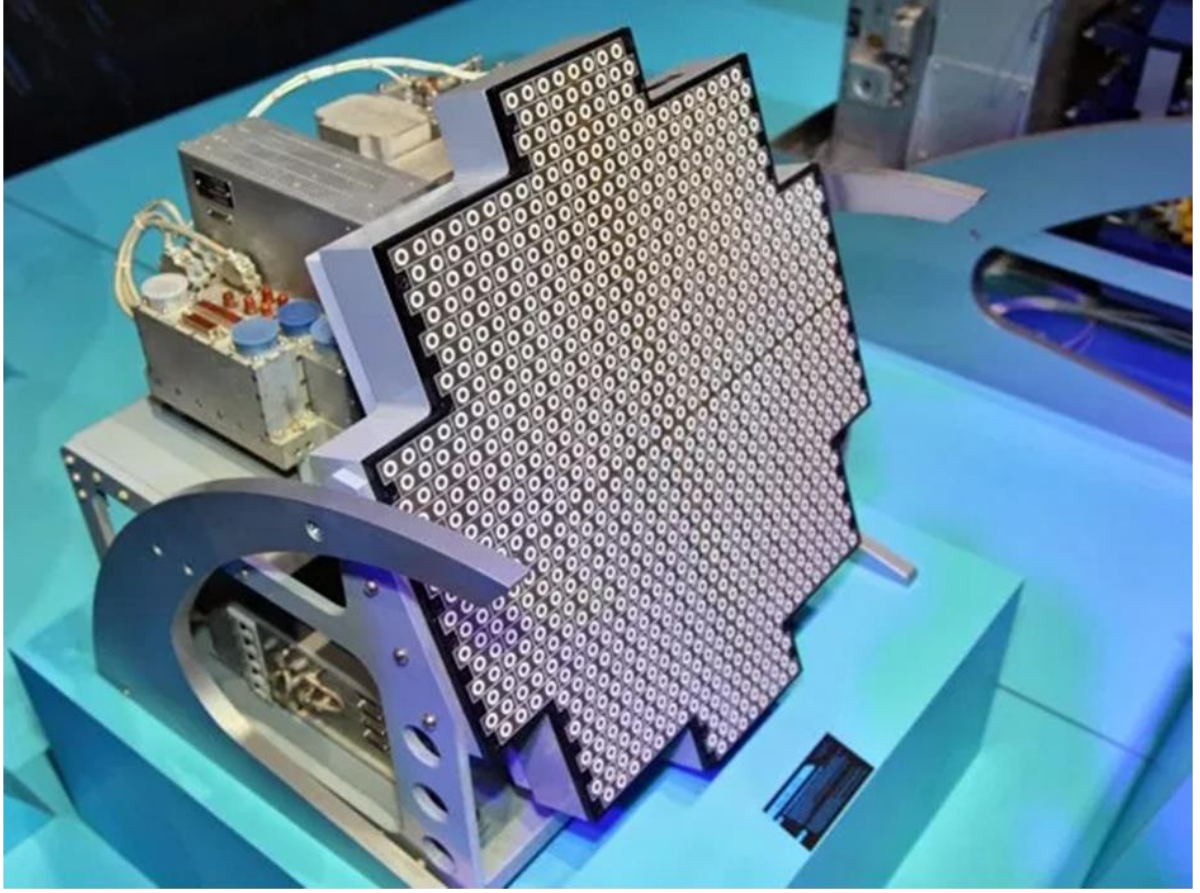
*Görünmezlik teknolojisinde ayrıca; demir mikro parçacıklarla kaplı demir içeren karbonil, elastomerler, iletken karbon yüklü gradyan kaplamalar, ayarlı frekans emiciler ve düşük frekans emicileri kullanılmaktadır. Sun Savunma Net*

Hava araçlarına görünmezlik özelliğinin kazandırılması maksadıyla radar kesit alanlarının düşürülmesi, radarlardan gelen sinyallerin dağıtılması ve/veya emilmesi, kızıl ötesi imzanın azaltılması, türbülans izinin asgariye indirilmesi, görsel tespit

özelliklerinin azaltılması ve alçak/arazi uçuşu yapılması gibi teknikler kullanılmaktadır. Hava araçları üzerlerine gelen radar sinyalinin %99'unu radardan uzağa doğru dağıtacak, geriye kalan enerjinin %99'unu da soğuracak şekilde tasarlanabilir.

### ***Radyofoton Radarlar***

Rusya'nın, radyofoton radarlara sahip olduğu ve bu radarları laboratuvar ortamında çalıştırmayı başardığı uzun zamandır bilinen bir gerçektir. Rusya, 2021 yılına kadar radyofoton radarları, Su-25 modeli savaş uçaklarına takmayı da planlamaktadır.



*Geleceğin radarı, ağırlığı yarıdan fazla azalırken ve çözünürlüğü on kat artarken iletişim ve radar imkânlarını büyük oranda artıran foton teknolojisine dayanacaktır. Foto: Thai Military and Asian Region.*

Radyofoton radarların günümüzde kullanılan radarlara oranla ağırlığı yarıya inecek ve ayırım kabiliyetleri de 10 kat veya daha büyük olacaktır. Rusya KRET Firması, 2010 yılından beri ROPAA Projesi (Radio Optical Phased Array Antenna- Radyo Optik Faz Sıralı Anten) kapsamında radyofoton radar çalışmalarını sürdürmektedir.

Defence Blog'da 10 Temmuz 2018 tarihinde yayınlanan bir yazıda da Rusya'nın 6'ncı nesil savaş uçaklarında kullanılmak üzere bir radyofoton radar üzerinde çalıştığına

dair bilgiler verilmiştir. Radyofoton radarlar, hava-hava ve uzun menzilli hava-kara muharebelerinde Rusya'ya kesin bir üstünlük kazandıracaktır.

Yerde konuşlanan radyofoton radarlar, konvansiyonel radarlara nazaran çok daha uzaktaki hedefleri tespit ve teşhis edebilecek ve hedeflerin gerçek fotoğraf görüntülerini oluşturabilecektir. Defence Blog sitesinin, Rusya Savunma Forumunda (Russia Defence Forum) yayınlanan bir yazıya dayandırdığı bilgilere göre; radyofoton radarların sağlayacakları avantajlar aşağıda sıralanmıştır:

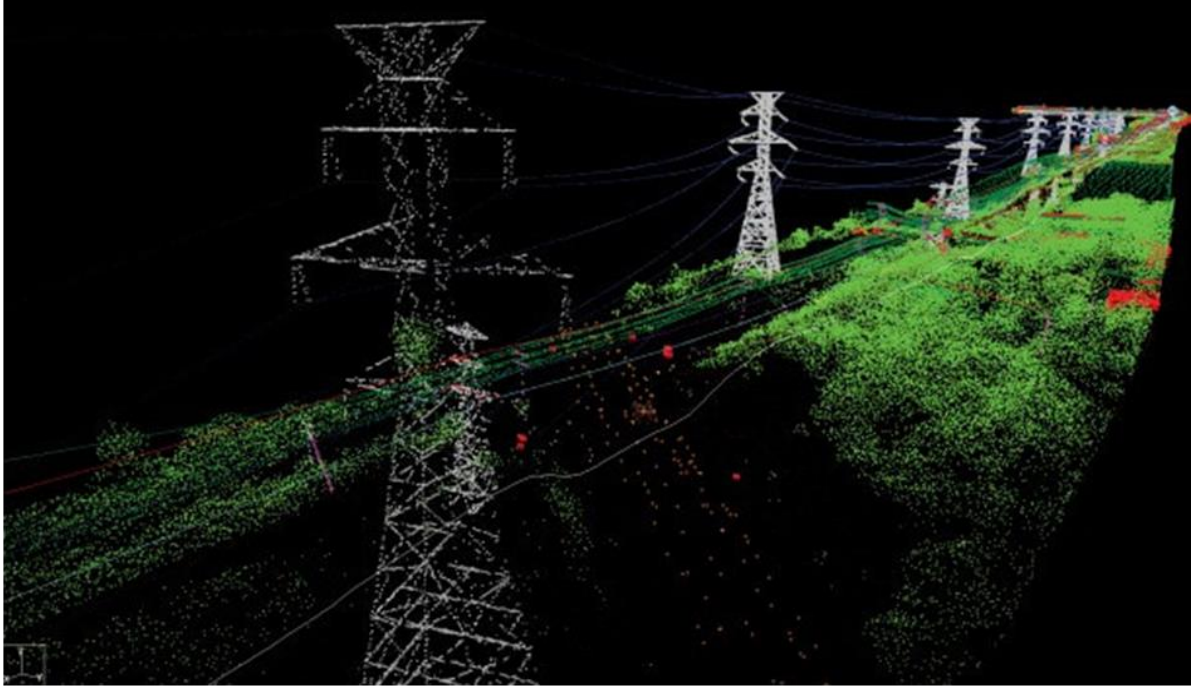
- Foton tabanlı elektronik, sunuculara olan ihtiyacı mevcut seviyesinden 1/100 oranında düşürecek ve veri transfer hızını 10 kat artıracaktır.
- Tam olarak geliştiklerinde foton radarlar, aynı güç, çözünürlük imkân ve kabiliyetleri sağlarken, büyük araçlara bağımlı iri ufuk ötesi radarlara olan ihtiyacı ortadan kaldıracaktır.
- KRET Firması tarafından radyofoton (foton esaslı) radarlar üzerinde yapılan ilk çalışmalar inanılmaz ölçüde gelecek vadetmektedir. Sahadaki gelişmeler henüz emekleme döneminde olmasına rağmen, hava araçları üzerindeki radarların (Hava Aracı Erken İhbar Radarları foton esaslı olduğunda) ağırlıklarını 1/2 oranında azaltırken çözünürlüğü de en az 10 kat artıracaktır.
- Foton esaslı radarların kendi ECM (Electronic Counter Measure-Elektronik Karşı Koyma) özellikleri birkaç kat artacak ve elektro manyetik fırtınalara karşı aşırı derecede dayanıklı olacaklardır.
- 2020 yılına kadar foton esaslı AESA (Active Electronically Scanned Array-Elektronik Taramalı Aktif Dizin) radarlarının imkân ve kabiliyetleri şaşırtıcı bir süratle büyüyecektir. Aktif Faz Dizinli Radarın (AESA), çağdaş mevcut radarlara oranla ağırlığı 1,5-3 kat azalacak, güvenilirlik ve etkinliği 2-3 kat ve tarama süratiyle çözünürlüğü birkaç düzine kat kadar artacaktır.
- Foton teknolojisi etkin bir şekilde konutlara da uygulanabilir, örneğin kentsel ve kırsal alanlardaki ısıtma sistemlerinde oldukça verimli bir şekilde kullanılabilir. Gelecekte, sıcak su yerine enerji fotonları kullanılacaktır. Enerjisi ısıya neredeyse %100 etkinlikle dönüştürülen saç kalınlığındaki fotonlar, fotonik kristal lifler içinde dağıtılacaktır.

Ruslar geliştirmekte oldukları foton esaslı radara ROFAR (Radyo Optik Faz Dizinli Radar) adını vermişlerdir. Rus devlet firması Radio Electronics Technologies (KRET) firması tarafından geliştirilen ROFAR (Radio-Optical Phased Array Technology) görünmezlik teknolojisine sahip düşman hava araçlarını hava-hava füzelerinin menzili dışında dahi görebilecektir.

ROFAR teknolojisinin sağladığı en büyük avantaj transmisyon frekansının genişliğidir. Günümüzün modern radar sistemlerinde transmisyon frekansı sadece 10 GHz iken ROFAR 100 GHz frekansına kadar ulaşabilmektedir.

Daha basite indirgeyelim; KRET Firması İcra Kurulu Başkanı danışmanı Vladimir Mikheyev'e göre radyofoton esaslı bir radarla 400 kilometre mesafedeki bir insanı yüzünden tanımak mümkün olacaktır.

Radyofoton radarların hava araçlarında kullanılması onların düşman unsurları tarafından tespit edilmelerini de önemli ölçüde zorlaştıracaktır. Hava araçları üzerine takılan radyofoton radarlar çok az ısı üreteceklerinden ilave soğutma sistemlerine ihtiyaç duymayacaktır. Hava araçlarına ilave soğutucu sistemlerin yerleştirilmemesi daha az elektrik ve yakıt tüketimi anlamına da gelmektedir.



*Foton esaslı bir radarın sağladığı görüntü. Foto: Full Afterburner.*

ROFAR sistemlerini yüksek güçlü karıştırma sistemleriyle karıştırmak da mümkün olmayacaktır. Bunu yapabilmeleri için düşman elektronik harp sistemlerinin menzilinin radyo alıcısının menzilinden büyük olması gerekmektedir, bu da foton esaslı radarlarda mümkün değildir.

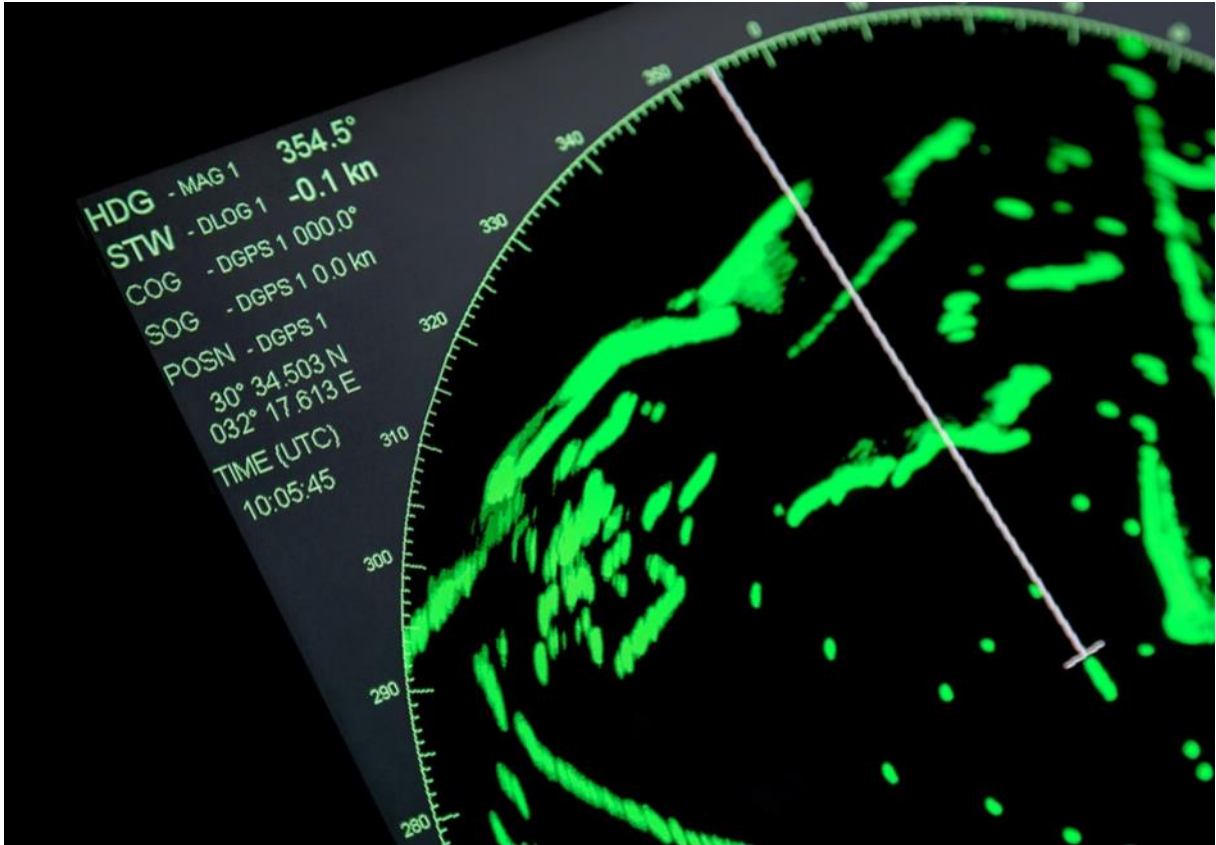
Birleşik Devletler de foton esaslı radarlar üzerinde 2014 yılından beri çalışmaktadır. Hatta Rusların ayırdığı 8,4 milyon dolara karşılık bu projeye 110 milyon dolar kaynak tahsis etmişlerdir.

Foton esaslı radarlar üzerinde çalışan sadece Rusya ve Birleşik Devletler değildir. Bu alandaki teknoloji yarışına İtalya ve Fransa da katılmış durumdadır. İtalyanlar Mart 2013 foton esaslı radarın çalışan bir modelini imal etmeyi başarmıştır, Thales Group icra kurulu başkan yardımcısı Jean-Loic Galle de bu alanda çalışmaya başladıklarını duyurmuştur.

## ***Fotonik Nedir?***

Fotonik, bir hava boşluğunda mevcut ışığı oluşturan temel parçacıklar olan ve ışık hızında hareket eden fotonların oluşturulması, yönetilmesi ve tespit edilmesinin yanı sıra fotonların kullanımıyla ilgili fizik ve teknolojiyi kapsayan bilimdir. Elektronların aksine fotonların ne kütlesi ne de yükleri bulunmaktadır. Bu nedenle fotonik sistemler harici elektro manyetik alanlardan etkilenmezler ve çok daha uzun bir transmisyon mesafesi ve bant genişliğine sahiptirler. Fotonlar, bunun yanı sıra elektronlara nazaran 10 kat daha fazla ilerleme hızına da sahiptirler.

Diğer bir ifadeyle fotonik bilimi, bilgilerin optik fiberler üzerinden gönderilmesinden, ışık sinyallerini modüle eden yeni sensörler yaratılmasına kadar uzanan yelpazede, optik sinyallerin kontrol ve dönüştürülmesiyle ilgilenmektedir. Bazı kaynaklara göre; “optik” ve “elektronik” terimleri aşamalı olarak ortadan kalkacak ve bu iki terimin yerini “**fotonik**” terimi alacaktır.



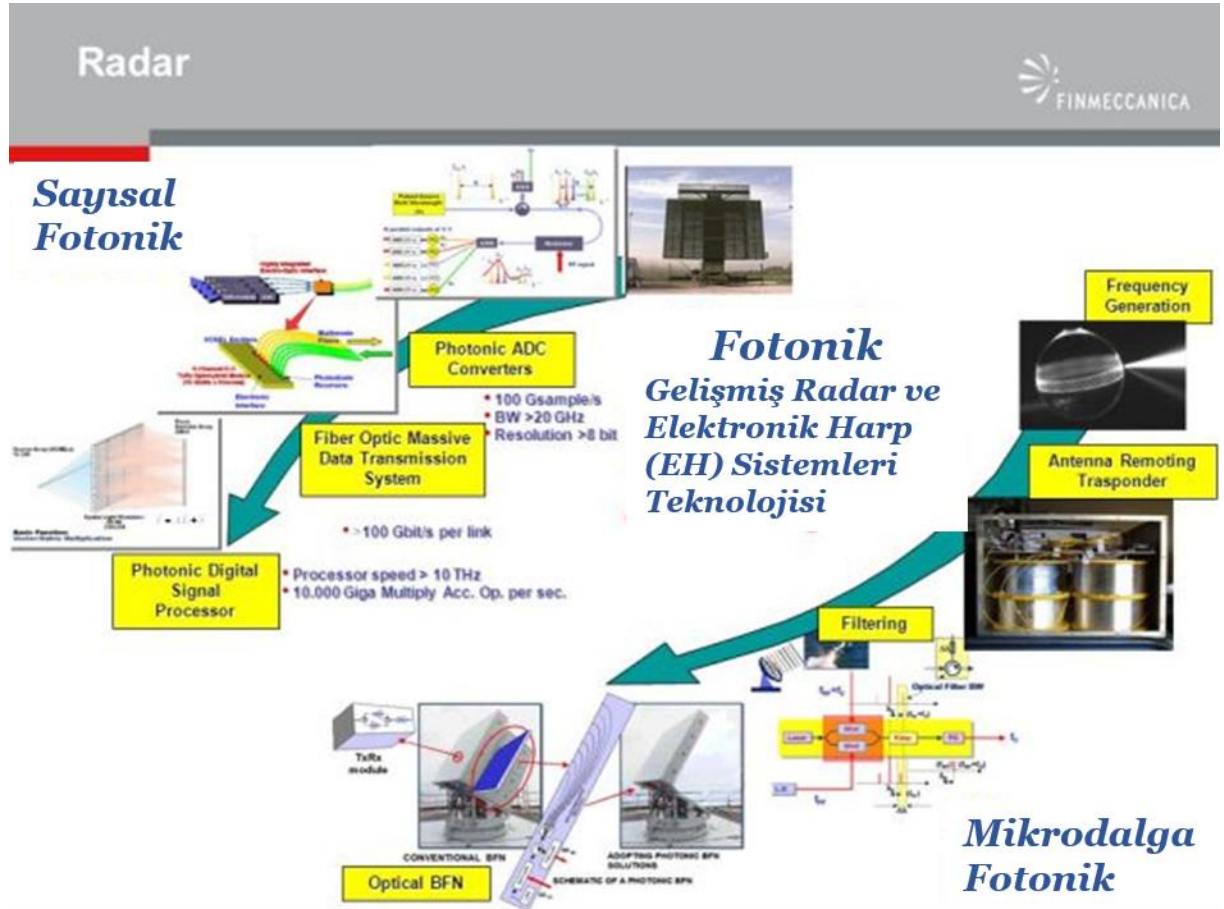
*Konvansiyonel bir modern radar ekranının görüntüsü. Foto: Full Afterburner*

Fotonları kullanan ilk önemli teknik cihaz 1960 yılında icat edilen lazerdir. Fiber optik transmisyonlar 1980'li yıllarda bütün dünyada yaygın olarak kullanılmaya başlandıktan sonra “fotonik” terimi çok daha yaygın hale gelmiştir. 20'nci yüzyılın sonlarına doğru fotonik büyük ölçüde telekomünikasyon üzerine odaklanmıştır. Fotonik bilimi, özellikle İnternetin gelişimi için temel zemini sağlamıştır. Halen radyo fotonik, “telekomünikasyon” fotonığının yerini almaya başlamış durumdadır. Bu yeni



istikamet; radyonik, dalga optikleri, mikro dalga optoelektronik ve bilim ile endüstrinin kavşak noktasında ortaya çıkmıştır.

Defence Blog ve Russia Defence Forum'dan verilen bilgiler bu kadar, aşağıda ise, Çinli üç bilim insanı tarafından kaleme alınan **“Geniş Bant Sinyal Jenerasyon ve İşlemcili Foton Esaslı Gerçek Zamanlı Ultra Yüksek Menzillik Çözünürlüklü Radar”** başlıklı bir makaleyi okuyacaksınız. Laboratuvar ortamında çalıştığı gösterilen bu radarın geliştirilmesi tamamlandığında, yukarıda belirtilen avantajlara ilave olarak, Birleşik Devletler'in hayalet uçaklarının görünmezlik özelliklerinin de artık hiçbir işe yaramayacakları öngörülmektedir.



Finmeccanica tarafından hazırlanan foton esaslı radarın çalışmasını açıklayan bir illüstrasyon. Foto: Full Afterburner

Lockheed Martin firması tarafından imal edilecek olan F-35 modeli savaş uçaklarının ana müşteri ülkesi Birleşik Devletlerdir. Birinci seviye ortak Birleşik Krallık, ikinci seviye ortaklar İtalya ve Hollanda, üçüncü seviye ortaklar **Türkiye**, Kanada, Avustralya, Norveç, Danimarka ve güvenlik iş birliği katılımcı ülkeleri de İsrail ve Singapur olmak üzere, ortak üretim programına toplam 11 ülke katılmaktadır.

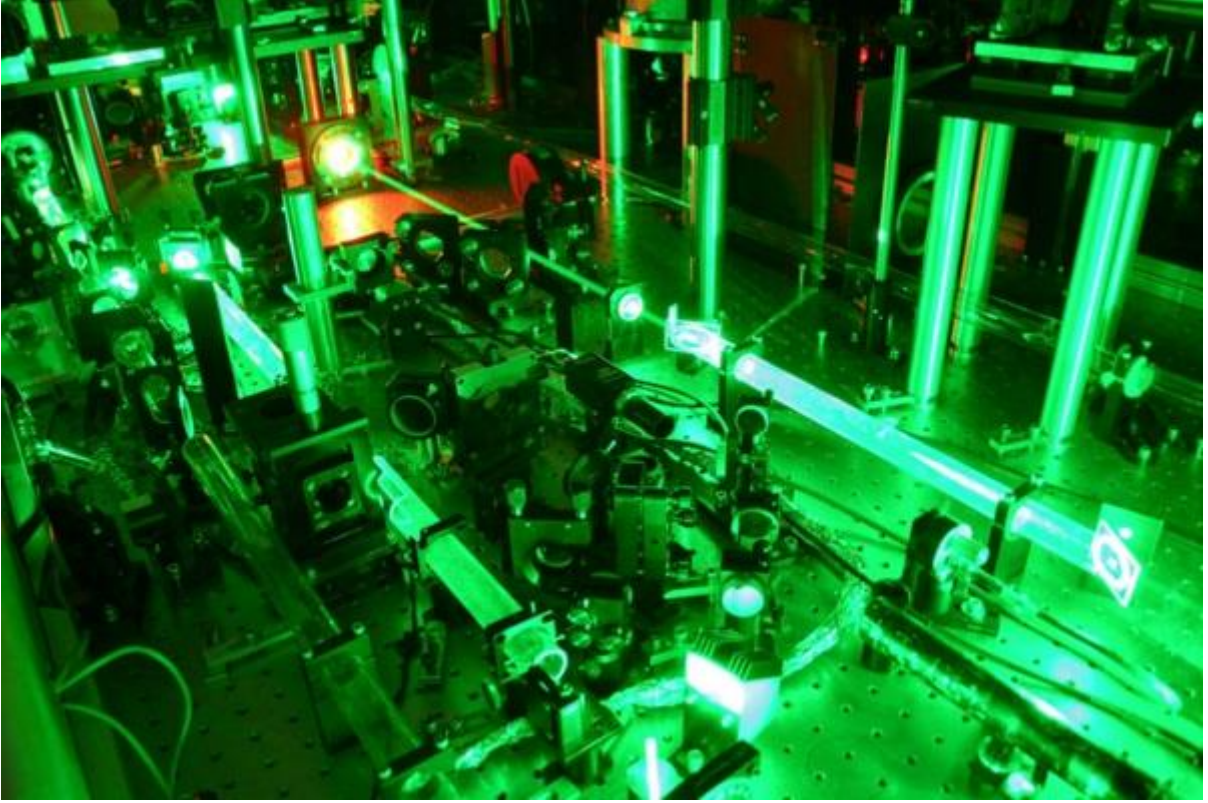
Lockheed Martin firması tarafından imal edilen F-35 Lightning modeli müşterek saldırı uçağının da görünmezlik özellikleri ortadan kalkabilecektir.

## ***Geniş Bant Sinyal Jenerasyon ve İşlemcili Foton Esaslı Gerçek Zamanlı Ultra Yüksek Menzillikli Radar***

### ***Özet***

Gerçek zamanlı ve yüksek çözünürlüklü hedef tespiti, modern radar uygulamalarında çok arzu edilen bir özelliktir. Tam manasıyla anlık bant genişliğine dayanan bu tür radarların geliştirilmesinde kullanılan elektronik teknikler büyük zorluklarla karşılaşmıştır.

Fangzheng Zhang, Qingshui Guo ve Shilong Pan tarafından kaleme alınan 23 Ekim 2017 tarihli bir makalede; optik sinyal oluşturma ve geniş bant Doğrusal Frekans Modülesi (LFM) özellikli, foton esaslı gerçek zamanlı yüksek menzillikli bir radar önerilmektedir.



*Laboratuvar ortamında foton esaslı radarla yapılan bir çalışma. Foto: Full Afterburner*

Geniş bant LFM sinyali, vericide foton frekansı dört katına çıkarılarak oluşturulmakta ve alınan eko, sıkıştırılmış yüksek yoğunluklu radar darbesinin (CHIRP), foton frekans karıştırma ile düşük frekans sinyaline dönüştürülmektedir. Sistem yüksek frekans ve geniş bantta çalışabilirken, aynı zamanda gerçek zamanlı prosesi de düşük hız analog-dijital dönüşümü ve dijital sinyal prosesiyle mümkün hale getirmektedir.

Kavramsal bir radar imal edilmiş durumdadır. 8-Ghz LFM (Lineer Frekans Modülasyonu) sinyalinin gerçek zamanlı prosesi; 500 MSa/s örnekleme oranıyla başarılmıştır. Hassas mesafe ölçümü; yaklaşık olarak 3,5 metre mesafede, azami 4 mm hata ile başarılmıştır. İki hedefin 1.875 cm kadar yüksek mesafe çözünürlüğü gösterilmiştir. Makalenin yazarları önerilen radar mimarisinin, mevcut radarların bant genişliği, süreç hızı gibi sınırlamalarının üstesinden gelebilecek güvenilir bir çözüm olduğunu ve gerçek zamanlı ve yüksek çözünürlüklü hedef tespit ve görüntüleme maksadıyla, geleceğin radarlarında kullanılan bir mimari olmasını ümit ettiklerini ifade etmektedirler.

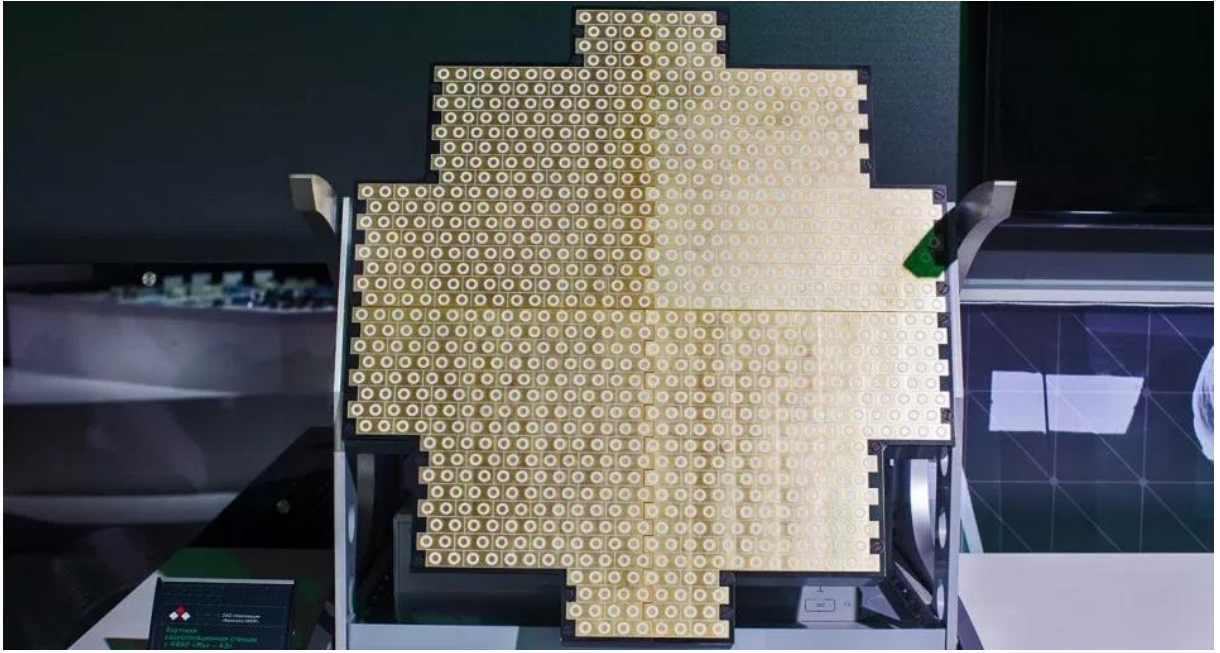
## Giriş

Gerçek zamanlı ve yüksek çözünürlüklü hedef tespit ve görüntüleme, bir radyo-frekans radarının yüksek frekans ve geniş bantta, gerçek zamanlı sinyal işleme kabiliyetiyle çalışmasını gerektiren, hızlı hareket eden hedeflerin yakalanma ve izlenmesi gibi sivil ve güvenlik uygulamalarında çok büyük bir öneme sahiptir (1,2). Bu gereksinim en gelişmiş elektronikler için dahi büyük zorluklar yaratmaktadır. Bir taraftan; radar göndericilerinde lineer frekans modülasyonu (LFM) sinyallerinin direkt dijital sentezleyiciler (DDS) tarafından direkt olarak oluşturulması birkaç gigahertz (3) ile sınırlıdır. Gerçi bu, bant genişliğinin çoklu frekansı yukarı dönüştürme aşamaları ile genişletilebilse de sinyal kalitesi kaçınılmaz bir şekilde bozulmakta ve nihayetinde tespit performansını etkilemektedir.



*Çinli bir firma, yaptığı 100 km uzaklıktan görünmezlik teknolojisine sahip hava araçlarını tespit edebilen yeni radar açıklamasıyla, bütün dünyadaki fizikçileri şok etmiştir. Foto: China Science.*

Diğer taraftan alıcıdaki Analog-Sayısal Dönüştürücülerin (ADC) hassasiyeti de çözünürlüğün yanı sıra süreç hızını da ciddi şekilde sınırlayan, giriş bant genişliği ve örnekleme oranı yükselirken hızla düşmektedir. Son zamanlarda; yüksek frekanslı RF sinyallerinin (3,4,5,6) oluşturulması, tespiti ve işlenmesi için, optik komponentlerin sağladığı yüksek frekans ve geniş bant çalışma kabiliyetlerinden faydalanan mikrodalga fotonik teknolojilerinin kullanılması gelecek vadeden bir çözüm olarak önerilmiştir. Bugüne kadar, 10 GHz sinyal bant genişliğinin kolaylıkla başarılabilirdiği, geniş bant LFM sinyallerinin fotonik oluşumu için birçok düzenler gösterilmiştir (7,8,9,10). Bununla birlikte bu tür geniş bant sinyallerinin, sinyal doğruluğundan ödün vermeden hızlı ve uygun şekilde işlenmesi hâlâ oldukça zor bir iştir.

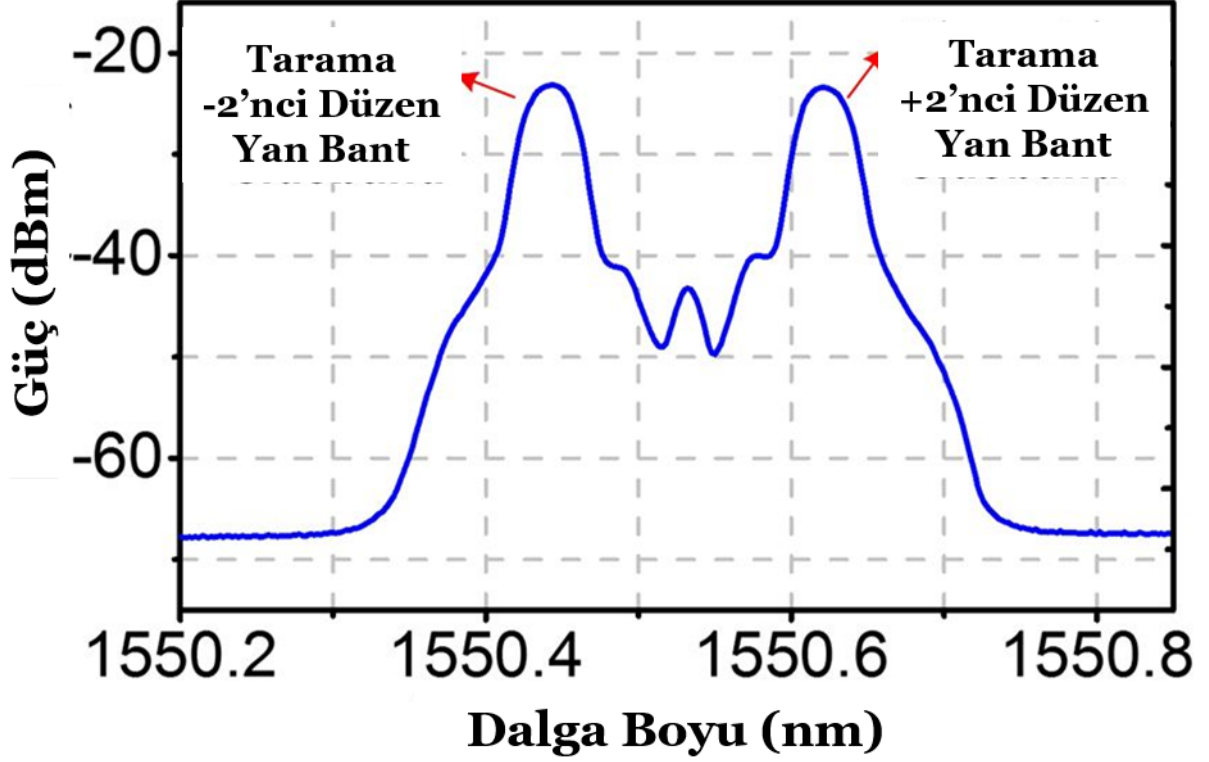


*Radyo fonda çağır açan bir buluş. Foto: Thai Military and Asian Region*

Araştırmacılar bu makalede; optik sinyal oluşturma ve geniş bant Doğrusal Frekans Modüleli (LFM) özellikli, foton esaslı gerçek zamanlı yüksek menzil çözünürlüklü bir radar önermektedirler. Göndericide, düşük hızlı bir elektrik sinyaline, tekli entegre elektro-optik modülatör uygulanarak frekansı dört kat artırılan geniş bant bir LFM sinyali oluşturulmuştur. Alıcıda, yansıyan LFM sinyali, fotonik frekans karıştırmaya dayanan bir işlem ile düşük frekanslı bir sinyale indirgenmiştir. Fotonik indirgeme uygulamasıyla elektriksel frekans dönüşümü olmaksızın, direkt olarak yüksek frekanslı ve geniş bantlı sinyaller işleme tabi tutulmuştur. Fotonik indirgeme sonrasında, alıcıda ılımlı örnekleme oranlı bir analog-sayısal dönüştürücü (ADC) kullanılabilir ve gerçek zamanlı proses gerçekleştirilebilir. Önerilen sistemde, elektriksel sinyal oluşturma ve prosesinden kaynaklanan bant genişliği sınırlamaları elimine edilmiştir. Onlarca hatta yüzlerce gigahertz büyüklüğüne ulaşan azami operasyon bant genişliği, esas olarak elektro-optik cihazlar tarafından belirlenmektedir. Sonuç olarak; çok yüksek çözünürlükle gerçek zamanlı radar tespit gerçekleştirilebilmektedir.



daha sonra bir **Optik Bağlaştırıcı (OC)** tarafından şekilde görüldüğü gibi iki eşit kola ayrılmaktadır. Kollardan bir tanesindeki optik sinyal, alınan ekoların radar darbesinin yüksek sıkıştırma oranının yayılma işleminde referans olarak kullanılmaktadır, diğer koldaki optik sinyal ise optik-elektrik dönüşümünü gerçekleştirmek üzere bir **Foto Detektöre (PD1)** gönderilmektedir.



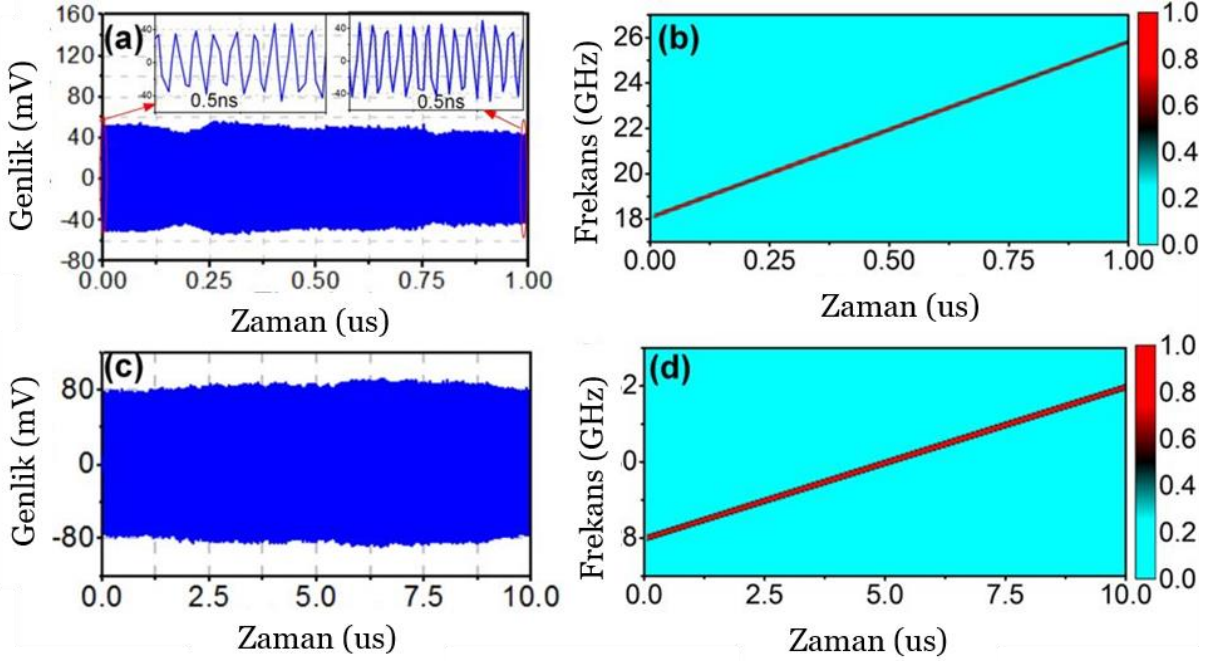
Şekil 2 - DPMZM sonrasında ölçülen optik spektrum. İki frekans tarama kenar bandı oluşturulmuştur. Grafik: Nature aracılığı ile Sun Savunma Net

Dönüşüm sonrasında elde edilen elektrik sinyal frekansı, başlangıçtaki ara IF-LFM sinyaline nazaran dört kat artmış durumdadır. Sonuç olarak;  $f_{LFM}(t) = 4f_o + 4kt$  anlık frekansında dört kat artırılmış bir LFM sinyali elde edilmiştir.

Frekansı dört kat artırılmış IF-LFM sinyali, geniş bant bir **Elektriksel Yükselteç (EA1)** tarafından yükseltilmekte ve hedef tespit maksadıyla bir **Anten (T)** üzerinden atmosfere gönderilmektedir. Hedef tarafından yansıtılan sinyal başka bir **Anten (R)** tarafından toplanmakta ve **Elektro-Optik Faz Modülatörüne (PM)** verilmeden önce **EA2** tarafından uygun şekilde yükseltilmektedir. **Faz Modülatörü (PM)**, optik bağlaştırıcının (OC), şekilde aşağıdaki kolundan gelen referans optik sinyalini modüle etmekte kullanılır.

Bu proste, referans sinyali içindeki iki optik yan bant;  $f_c - 2f_o - 2kt$  ve  $f_c + 2f_o + 2kt$  frekanslarında iki optik taşıyıcı olarak kabul edilebilir ve yansıyan LFM sinyali ile faz modülasyonuna tabi tutulurlar. Taşıyıcının  $f_c - 2f_o - 2kt$  frekansında faz modülasyonuna tabi tutularak oluşturulan 1'inci düzen yan bant frekansı, gönderilen

sinyal ile karşılaştırıldığında, “ $\Delta\tau$ ”nin yansıyan LFM sinyalinin zaman gecikmesi olduğu  $f_c+2f_0+2kt+4k\Delta\tau$  frekansında konuşlanmıştır.



Şekil 3 - Geniş bant ve yeniden konfigüre edilebilir LFM sinyal oluşturmanın sonuçları. (a) ve (b): 22 GHz merkezi frekans ve 1 MHz tekrarlama oranı ile oluşturulan 8-GHz LFM sinyalinin dalga şekli ve frekansı; (c) ve (d): 30 GHz merkezi frekans ve 100 kHz tekrarlama oranı ile oluşturulan 4-GHz LFM sinyalinin dalga şekli ve frekansı. Grafik: Nature aracılığı ile Sun Savunma Net.

Gönderilen LFM sinyalinin parametreleri,  $4k\Delta\tau$  değeri küçük bir değer olacak şekilde, tespit mesafesine göre ayarlanarak, bu 1'nci düzen yan bant  $f_c + 2f_0 + 2kt$  frekansındaki optik taşıyıcıya çok yakındır ve Optik Bant Geçirgen Filtre (OBPF) kullanılarak elde edilebilir. OBPF öncesinde bir Erbium Katkılı Elyaf Yükseltici (EDFA) optik gücü yükseltmek amacıyla kullanılabilir.

OBPF sonrasında optik sinyal, optik-elektrik dönüşümü için başka bir foto detektöre (PD2) gönderilir.  $\Delta f = 4k\Delta\tau$  frekansında bir elektrik sinyali elde edilir. Yüksek frekans karışımından kaçınmak için uygun bant genişliğinde bir elektrikselsel düşük geçirgenli filtre (ELPF), PD2'den sonra uygulanabilir. Bu noktaya gelindiğinde alınan LFM sinyalinin fotonik frekans karıştırma esaslı yayılım (de-chirping) işlemi tamamlanmış olur.

Pratikte, bu yayılım frekansı, düşük hızlı elektrikselsel analog-sayısal dönüştürücü (ADC) kullanılarak yayılmış (de-chirped) sinyal örneklemeyle ve sonrasında basit spektral analiz yapılarak elde edilebilir. “ $4k$ ”nin yayınlanan LFM sinyalinin yüksek yoğunluk sıkıştırma oranı olduğu göz önüne alındığında “ $\Delta\tau$ ” zaman gecikmesi aşağıdaki formülle ifade edilebilir:

$$\Delta_T = \frac{\Delta f}{4k} = \frac{T\Delta f}{B} \quad (1)$$

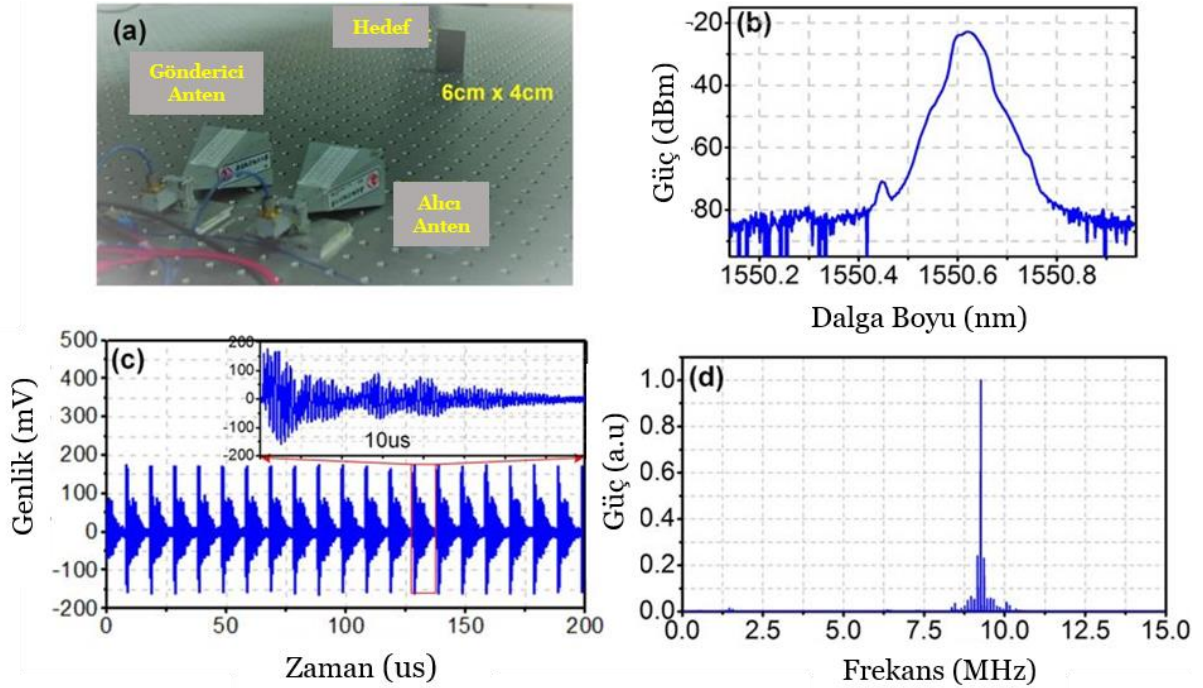
Formülde “B” bant genişliği ve “T” de anten tarafından gönderilen LFM sinyalinin geçici süresidir. Hedefin mesafesi de aşağıdaki formülle bulunur:

$$L = \frac{\Delta_T}{2} c = \frac{c}{2B} T\Delta f \quad (2)$$

Ayrılabilir asgari spektral aralık  $\Delta f_{min} = 1/T$  olduğundan radarın mesafe çözünürlüğü aşağıdaki şekilde olacaktır:

$$L_{RES} = \frac{c}{2B} T\Delta f_{min} = \frac{c}{2B} \quad (3)$$

Üç nolu denklem, gönderilen sinyaldeki geniş bant genişliğinin, yüksek mesafe çözünürlük elde edilmesine yardımcı olacağı görülmektedir. Önerilen radar çözümünde, LFM sinyallerinin fotonik oluşturma ve yayılım işlemi çok geniş operasyon bant genişlikleri sağlayabilir. Fotonik yayılım işlemi sonrasında, alıcıda gerçek zamanlı sinyal işlemeyi mümkün kılan ılımlı bir örnekleme hızı ve yüksek hassasiyete sahip bir analog-sayısal dönüştürücü (ADC) kullanılabilir.

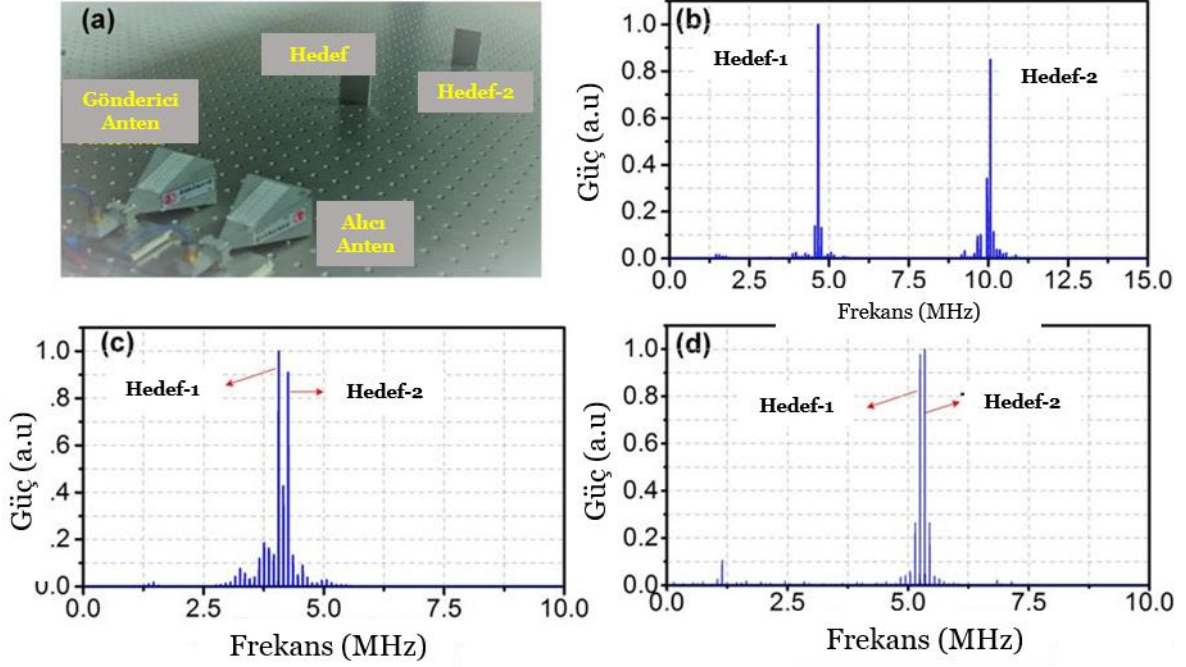


Şekil 4 - (a) Tek hedef tespiti için konfigürasyon; (b) OBPF sonrasında optik spektrum; (c) Hedef ve anten çifti arasındaki mesafe 173,6 cm iken de-cirphed sinyalin geçici dalga şekli; (d) 9.253 MHz spektral tepe noktasıyla de-cirphed sinyalin normalleştirilmiş güç spektrumu. Grafik: Nature aracılığı ile Sun Savunma Net.

Bu nedenle yüksek çözünürlüklü gerçek zamanlı hedef tespit yapılabilir. Bu yazıda önerilen foton esaslı radarın sabit hedeflerin tespit edilmesinde kullanılmasına



odaklanılmıştır. Önerilen radarı çeşitli uygulamalar için çok ümit verici bir uygulama haline getiren; hareketli anten veya hareketli hedef, sentetik açıklıklı radar (SAR) görüntüleme veya Ters Sentetik Açıklıklı Radar (ISAR) görüntülemesi de yapılabilir (16,17).



Şekil 5 - (a) İki hedefin tespiti için sistem diyagramı; (b) 87,4 cm ve 188 cm mesafeye yerleştirilen iki hedefin de-chirped sinyal pozisyonlarının güç spektrumu; (c) iki hedef birbirinden 3,8 cm ayrıldığında de-chirped sinyalinin güç spektrumu; (d) iki hedef birbirinden 1,9 cm ayrıldığında de-chirped sinyalinin güç spektrumu. Grafik: Nature aracılığı ile Sun Savunma Net.

### Geniş Bant LFM Sinyal Oluşumu

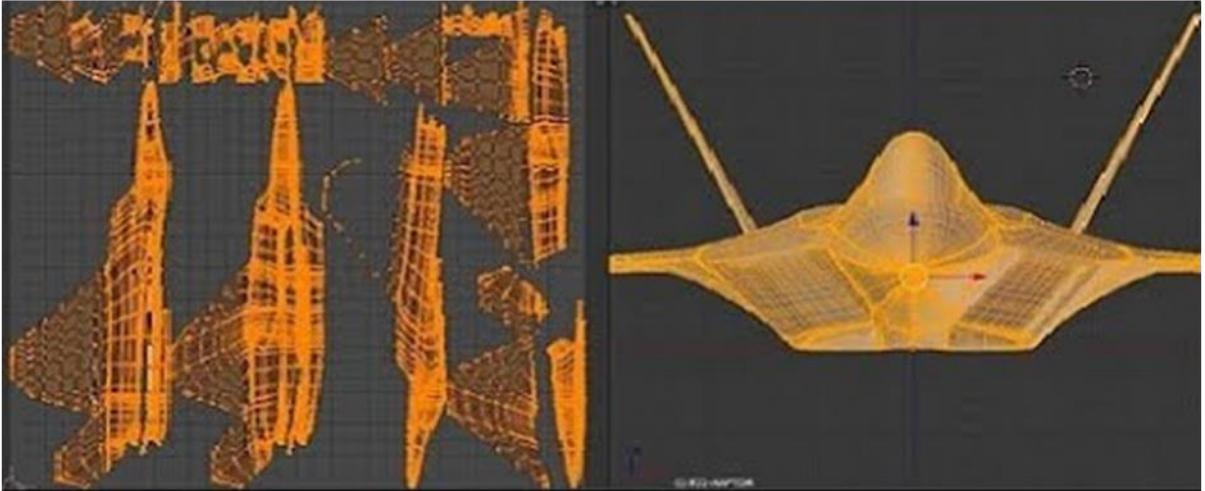
Örnek olarak; 2 GHz bant genişliğinde, 5,5 GHz'de merkezlenmiş 1 MHz tekrarlama oranlı sürekli dalga IF-LFM sinyali DPMZM'ye besleme maksadıyla uygulanmıştır. DPMZM ön gerilimleri dikkatli bir şekilde ayarlandıktan sonra, IF-LFM giriş sinyalinin dört kat frekans artırımı gerçekleşmiştir. Şekil 2, iki frekans tarama optik yan bantlarının ( $\pm 2$ 'nci düzen yan bantlar), arzu edilmeyen yan bantların iyice bastırılarak oluşturulduğu DPMZM sonrasındaki optik spektrumu göstermektedir.

Şekil 3(a) oluşturulan LFM sinyalinin bir dönemdeki ( $1 \mu s$ ) ölçülen dalga boyunu göstermektedir. LFM sinyalindeki frekans değişimi, Şekil 3(a)'daki dalga formları karşılaştırılarak kolayca görülebilir. Şekil 3(b), kısa süreli Fourier dönüştürme (STFT) analizi uygulanarak elde edilen Şekil 3(a)'daki dalga şekline karşılık gelen anlık frekansı göstermektedir.

Görülebildiği gibi frekans aralığı, frekansı dört kat artırma kabiliyetini de doğrulayan 18 GHz ile 26 GHz ve sinyal bant genişliği 8 GHz'dir. LFM sinyali bant genişliği ve tekrarlama oranı, mevcut düşük hızlı elektriksel sinyal jeneratörleri ile yapılabilen, IF-LFM sinyalinin parametreleri değiştirilerek kolaylıkla ayarlanabilir. Bu nedenle yeniden konfigüre edilebilir LFM sinyal oluşturulması yapılabilir. Şekil 3(c), IF-LFM sinyali 1 GHz bant genişliği ve 100 kHz tekrarlama oranıyla 7,5 GHz'de merkezlendiğinde oluşturulan LFM sinyalinin geçici dalga şeklini göstermektedir. Karşılık gelen ve Şekil 3(d)'de gösterilen frekans, 10 µs geçici bir süre ile 28 GHz – 32 GHz aralığını kapsamaktadır.

## **Geniş Bant Sinyal Jenerasyon ve İşlemcili Foton Esaslı Gerçek Zamanlı Ultra Yüksek Menzil Çözünürlüklü Radar**

**Rusya tarafından geliştirilen Radyofoton Radar ile hedeflerin Üç Boyutlu (3D) görüntüleri de elde edilecek!**



## **RADYOFOTON RADARLAR**

### **Sıkıştırılmış Darbeli Radar Ekolarının De-chirp İşlemi**

100 kHz tekrarlama oranlı ve 8 GHz (18 GHz'den 26 GHz'e) bant genişliğindeki K-Bant LFM sinyalinin yayılım (de-chirp) işlemi gösterilmiştir. LFM sinyali yükseltilmiş ve Şekil 4(a)'da görüldüğü gibi, hava iletimiyle 6 cm x 4 cm ebatlarında metal bir hedefe yönlendirilmek üzere K-bant boynuz antene gönderilmiştir. Bu gösterimde hedef verici antenden 173,6 cm uzağa yerleştirilmiştir.

Yansıyan sinyal, verici antenin yakınına yerleştirilen diğer bir K-bant boynuz anten tarafından toplanmıştır. Alınan sinyal, 40-GHz faz modülatörünün (**PM**) RF girişine gönderilmeden önce başka bir geniş bant yükselteç tarafından

yükseltilmiştir. Faz modülasyonu (PM) sonrasında optik sinyal bir Erbium Katkılı Elyaf Yükseltici (EDFA) tarafından uygun şekilde yükseltilmiştir.



*Foto: Defence Blog*

Sonrasında, bant genişliği ve frekansı ayarlanabilen bir OBPF gereken optik frekans komponentlerini seçmek amacıyla uygulanmıştır. OBPF sonrasındaki optik spektrum Şekil 4(b)'de görülmektedir. Bu optik sinyal 10-GHz'lik foto detektöre (PD<sub>2</sub>) gönderilmiş ve oluşturulan elektrik sinyali 3-dB bant genişliği olan 500 MHz'lik Elektriksel Düşük Geçirici Filtreye (ELFP) gönderilmiştir.

Sonrasında, yayılmış sinyal, gerçek zamanlı bir osiloskop tarafından sayısal hale dönüştürülmüş ve Hızlı Fourier Dönüşümü (FFT-Fast Fourier Transform: Düşük hızlardaki işlemcilerin yüksek miktarda veriyi işlemesinde kullanılan bir dönüşüm algoritmasıdır) esaslı gerçek zamanlı spektral analiz yapabilen, aynı osiloskop tarafından işleme tabi tutulmuştur. Yayılmış sinyal 200  $\mu$ s zaman diliminde 500 MSa/s örnekleme oranı ile elde edilmiş ve sonrasında gerçek zamanlı olarak işlenmiştir. Şekil 4(c) kaydedilen detaylı dalga şeklini göstermektedir.

Yayılmış sinyalin normal hale getirilen güç spektrumu, 9.253 MHz spektral tepe noktasının yayılmış (de-chirped) sinyalin frekansına üstün geldiği Şekil 4(d)'de gösterilmektedir. Şekil 4(d)'deki güç spektrumu elde edilirken, güç kabloları ve diğer cihazlardan kaynaklanan zaman gecikmelerinden kaynaklanan frekans kaymasını

yok etmek için basit bir kalibrasyon yapılmış ve böylelikle yayılmış sinyal frekansı, hedef ile anten çifti arasındaki zaman gecikmesi ile orantılı hale getirilmiştir.

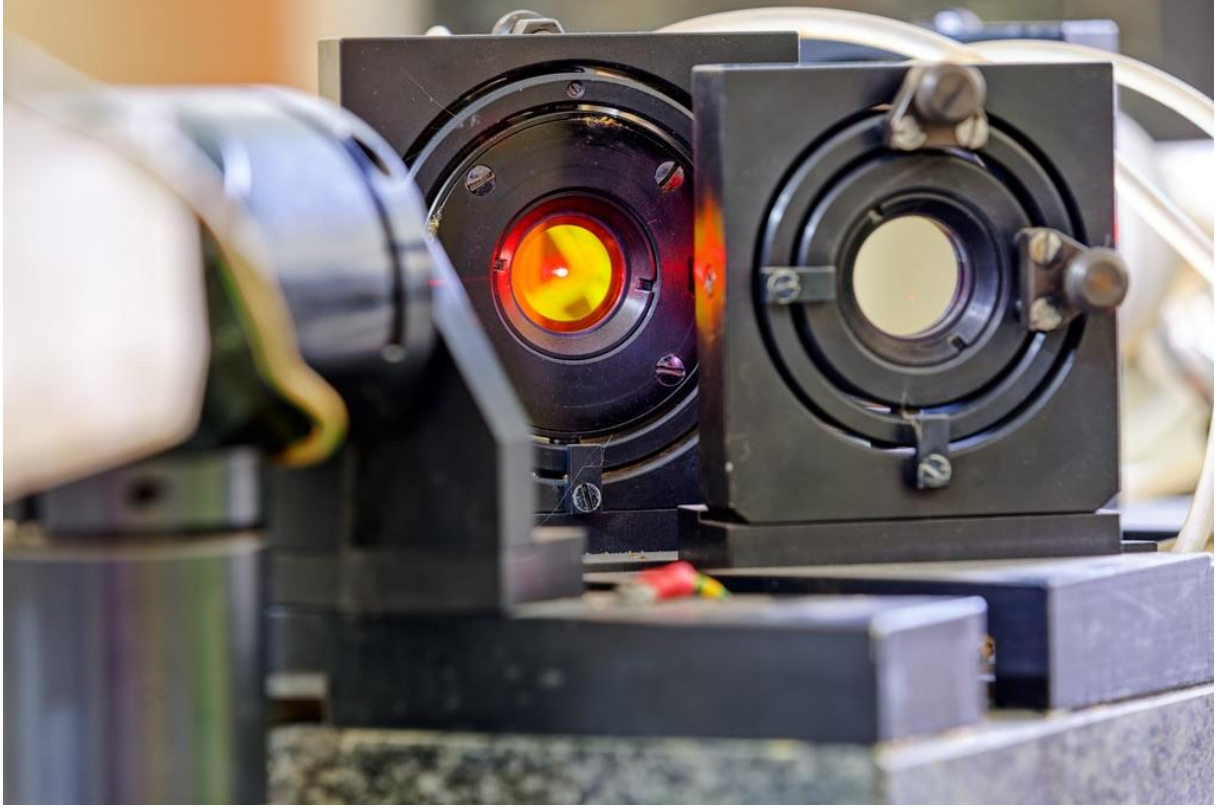


### **Radar Hedef Tespiti**

Şekil 4(c) ve Şekil 4 (d)'ye karşılık gelen durumda, hedef ile anten çifti arasındaki mesafe 173,5 cm olarak hesaplanmıştır ve ölçüm hatası 1 mm'dir. Hedef pozisyonu değiştirilerek çoklu mesafe ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Azami mesafe, deney koşullarının izin verdiği ölçüde ayarlanmıştır. Ölçüm sonuçları: (52,0 cm, 51,7 cm), (79,5 cm, 79,8 cm), (128,3 cm, 128,5 cm), (327,5 cm, 327,8 cm), (303,2 cm 302,8 cm) ve (353,6 cm, 353,4 cm)'dir. (a-b)'deki "a" gerçek mesafe ve "b" de ölçülen mesafedir. Azami ölçüm hatası, çok hassas mesafe ölçümünün yapıldığını gösterecek şekilde sadece 4 mm'dir.

Sonrasında iki hedefin tespit edilmesi gösterilmiştir. 6 cm X 4 cm ebatlarında iki aynı hedefi ve anten çiftini içeren sistem diyagramı Şekil 5(a)'da gösterilmiştir. Şekil 5 (b), iki hedefin anten çiftinden 87,4 cm ve 188,0 cm mesafedeyken yayılmış sinyalin güç spektrumunu göstermektedir. Şekil 5(b)'de, iki hedefe karşılık gelen iki spektral tepe noktası açık bir şekilde görülmektedir. İki spektral tepe noktasına karşılık gelen hesaplanan mesafeler, sırasıyla 1 mm ve 4 mm ölçüm hatalarıyla, 87,3 cm ve 188,4 cm'dir. İki hedef birbirlerine çok yakın yerleştirildiğinde iki spektral tepe noktası arasında küçük bir frekans boşluğu bulunmaktadır. Şekil 5(c), iki hedef birbirlerinden 3,75 cm uzak olduklarında yayılmış sinyalin güç spektrumunu göstermektedir. İki spektral tepe noktası arasındaki frekans boşluğu 200 kHz'dir ve hedefler arasındaki hesaplanan mesafe gerçek değere çok yakın olan 3,75 cm'dir.

Mesafe çözünürlük denklemine ( $L_{RES}=c/2B \times T\Delta f_{min}=c/2b$ ) göre “ $L_{RES}$ ” veya iki hedef arasındaki asgari ayırma duyarlılığı mesafesi; iki spektral tepe noktası arasındaki aralığın, LFM sinyalinin tekrarlama oranına eşit olduğu duruma karşılık gelen 1.875 cm’dir. Şekil 5(d), yayılmış sinyalin, iki hedef birbirlerinden 1,9 cm uzaklıkta yerleştirildiğindeki güç spektrumunu göstermektedir. İki hedefin birbirinden kolaylıkla ayırt edilebildiğini gösteren, 100 kHz aralıklı iki spektral tepe noktası gözlenmiştir.



Hedef tespit deneyinde mesafe ölçüm hatası radar mesafe ayırma yeteneği ile ilgilidir. Spesifik olarak FFT yoluyla hesaplanan spektrum, yayınlanan LFM sinyalinin tekrarlama oranına eşit olan sıralı ayırık spektral hatlardan oluşmaktadır. Hedefin mesafesi  $\pm L_{RES}/2$  içinde kalacak şekilde değiştiğinde, azami genlikli spektral hat pozisyonunu değiştirmeyebilir ve hesaplanan mesafe değişmeden kalarak  $L_{RES}/2$ ’den daha büyük olmayan bir ölçüm hatasına neden olur. Bu nedenle hedeften yansıyan eko sinyali, gürültü veya diğer spektral sinyaller tarafından örtülmediğinde, kurulu 8-GHz radar için mesafe ölçüm hatası 9,375 cm içinde muhafaza edilir.

## **Tartışma**

Göndericide, foton frekans çoğaltımı yoluyla sinyal oluşumu, yüksek merkezi frekansta geniş bant LFM sinyalleri oluşturma potansiyeline sahiptir. Önerilen radarda frekansın dört kat artırılması benimsense de oluşturulan LFM sinyallerinin

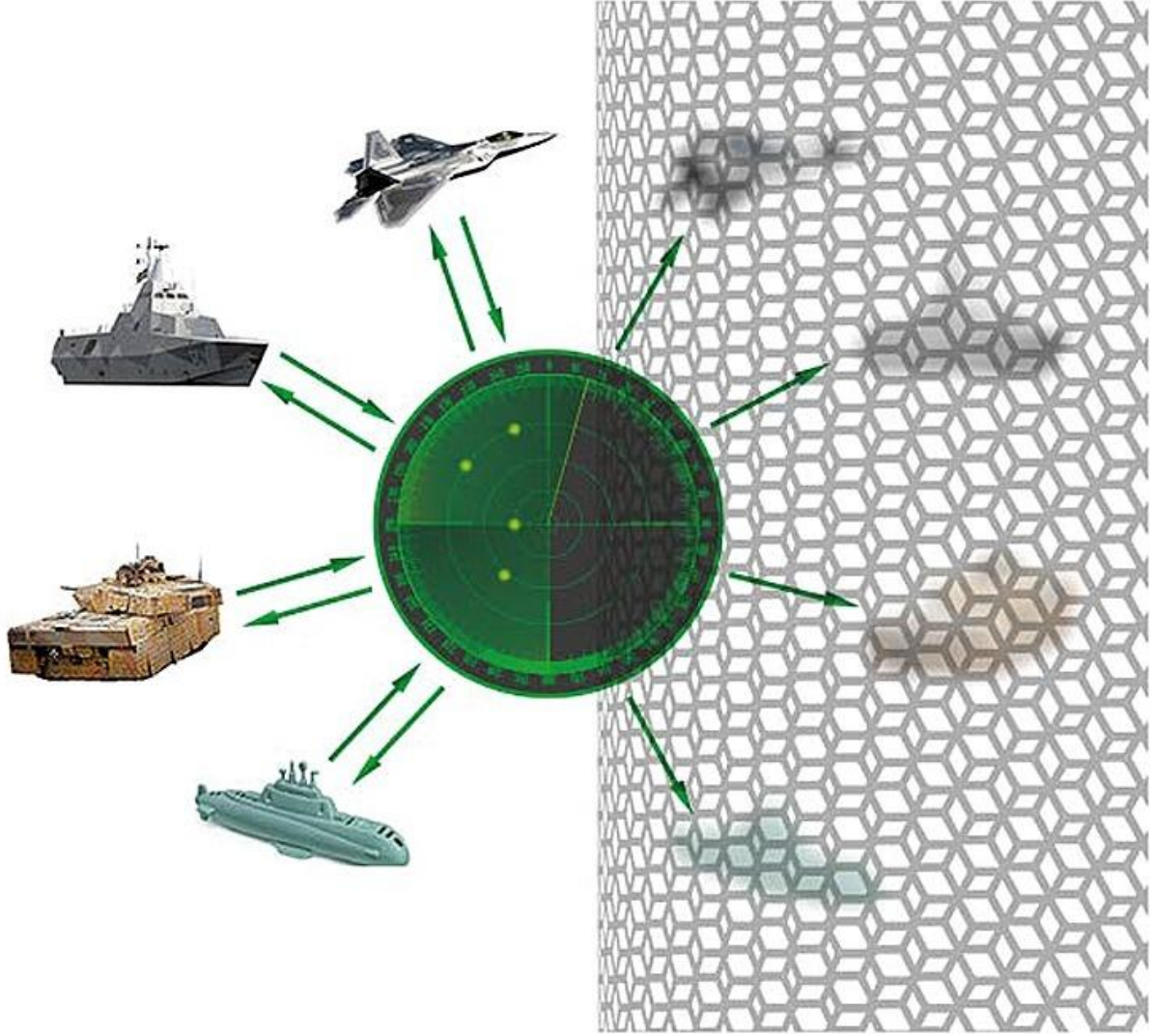
bant genişliği ve merkez frekansını daha da artırmak için 18 kadar foton frekans çoğaltma faktörü (18) kullanılabilir. Elektriksel frekans çoğaltıcılara benzer şekilde, bir foton frekans çoğaltıcı da sinyal bozulmalarına neden olmaktadır. İlk olarak sinyal-gürültü oranı (SNR) düşebilir.



Hedef tespiti için yapılan deneyde IF—LFM sinyalinin iç bant sinyal gürültü oranı (SNR) 86 dB olarak ölçülmüştür. Foton frekans dört kat artırımı sonrasında, PD1 sonrasında elektriksel yükseltme yapılmadan ölçülen bant içi SNR 72 dB'e gerilemiştir. İkinci olarak frekansın dört kat artırılması sonrasında parazit özelliği bozular. Kurulu sistemde, bant içi bozulma gürültü tabanına eşit olduğunda SNR olan bant içi parazitsiz dinamik aralık (SFDR), sinyal frekansının dört kat artırımı öncesi ve sonrasında sırasıyla 55 dBc ve 49 dBc olarak ölçülmüştür.

Sinyal bozulmaları, frekans çoğaltımındaki doğal sinyal bozulmasının yanı sıra foto detektördeki optik-elektriksel dönüşüm gibi fotonla ilgili operasyonlara da bağlıdır. Pratikte bu sinyal bozulmaları radar tespit mesafesi ve hassasiyetini etkileyebilir. Göndericideki olası bir diğer problem de sistemin istikrarını bozabilen DPMZM'nin sapma kaymasıdır. Uzun vadeli istikrarlı bir radar çalışması elde edebilmek için sapma kontrol devreleri (19) kullanılmalıdır.

Alıcıda, fotonik frekans karıştırma dayanan sinyal yayılım işlemi esnasındaki radyo frekans (RF) dönüşüm kaybı, radar performansını etkileyen önemli bir problemdir. Kurulu sistemde, optik yükselteç ile fotonik yayılım modülünün RF dönüşüm kaybı, mevcut elektriksel frekans karıştırıcıları ile karşılaştırılabilen, yaklaşık olarak 5 dB olarak ölçülmüştür.



*Görünmezliğe doğru giden yol tersine mi dönüyor? İllüstrasyon: ScienceDirect*

Oluşturulan LFM sinyal fotonik de-chirping modüle bir elektrik kablosu ile besleyerek ölçülen SFDR, göndericide oluşturulan LFM sinyaline yakın olan, yaklaşık olarak 48 dB'dir. Bu nedenle fotonik de-chirping fazla performans bozulmasına neden olmayacaktır. Radar alıcısıyla ilgili diğer bir problem OBPF kullanımıdır.  $f_c+2f_0+2kt$  ve  $f_c+2f_0+2kt+4k\Delta\tau$  denkleminde vurulanması ile elde edilen de-chirped sinyal, optik taşıyıcıların  $f_c+2f_0+2kt$  ve  $f_c+2f_0+2kt+4k\Delta\tau$  denkleminde vurulanması ile elde edilen sinyal ile aynı frekansta olduğundan, teorik olarak OBPF'e gerek yoktur.

Bununla birlikte özellikle, faz modülasyonu sonrasında EDFA uygulandığında de-chirped sinyalin sinyal gürültü oranını (SNR) geliştirmek için OBPF kullanılmasını öneriyoruz. Burada OBPF, LFM sinyalinin asgari frekansı küçükken arzu edilen optik frekansları seçebilmek için keskin bir azalma ve yassı bir tepe noktasına sahip olmalıdır. Deneyde ayarlanabilir OBPF asgari 50 pm (~6.25 GHz) bant genişliğine sahiptir ve transmisyon yan kenarı da 5GHz'den az olmayan minimum frekanslardaki LFM sinyallerinin de-chirping işlemi için 500 dB/nm kadar yüksektir (20).



*Sovyet hava savunma sistem ağına sızarak nükleer silahlarla düşman hedeflerine saldırmak için geliştirilen B-2 Spirit, Birleşik Devletler'in envanterindeki en gelişmiş bombardıman uçağıdır. İlk maliyeti 515 milyon dolardır. Saatte 680 mil hız yapabilen B-2 Spirit bombardıman uçağı azami 50.000 feet irtifaya kadar çıkabilir ve yakıt ikmali yapmadan 6.000 mil mesafe kat edebilir. Görünmezlik kabiliyeti kazandırılmak maksadıyla hava aracının yaklaşık olarak %80'i cam, karbon ve grafitten oluşan kompozit maddelerden, geri kalan kısımları da alüminyum ve titanyumdan imal edilmiştir. Uçağın tüm gövdesi radyasyon soğurucu madde ile kaplanmıştır. B-2 Spirit bombardıman uçağının radar kesit alanı "BÖCEK" kategorisindedir. Uçak, uydulardan güdülebilen 2.000 libre ağırlığında, 16 adede kadar Joint Directed Attack Munition (JDAM) taşıyabilir. Radar soğurucu kaplamanın korunma ihtiyacı nedeniyle B-2 Spirit sınırlı sayılı hava üslerinde muhafaza edilebilmektedir. Amerika'nın Missouri eyaletinde bulunan Whiteman Hava Kuvvetleri Üssünden Irak'a yapılan bir uçuş 38 saat sürmekte ve 4-5 kez havada yakıt ikmali gerektirmektedir. Uçan yarasa kanatlının Birleşik Devletler envanterinde 40-50 yıl daha görev yapması öngörülmektedir. Tabi ki Rus ve Çin yapımı foton esash radarlar izin verirse. Foto: Task&Purpose aracılığı ile Sun Savunma Net.*



Modern sayısal radar alıcılarında 500 MSa/s örnekleme oranında gerçek zamanlı sinyal işleme problem değildir, bu nedenle hedef tespiti önerilen radar ile gerçekleştirilebilir. Uzak mesafedeki bir hedefi tespit ederken de-chirped sinyalin alıcının gerçek zamanlı işlem bant genişliği içinde bir frekansa sahip olmasını sağlamak amacıyla, gönderilen LFM sinyali, IF-LFMCW giriş sinyalinin bant genişliği ve giriş tekrarlama oranı Şekil 3'de görüldüğü gibi ayarlanarak düşürülebilir. Bununla birlikte bu, bant genişliğinde bir azalmaya neden olur ve nihayetinde de menzil çözünürlüğünü bozar.

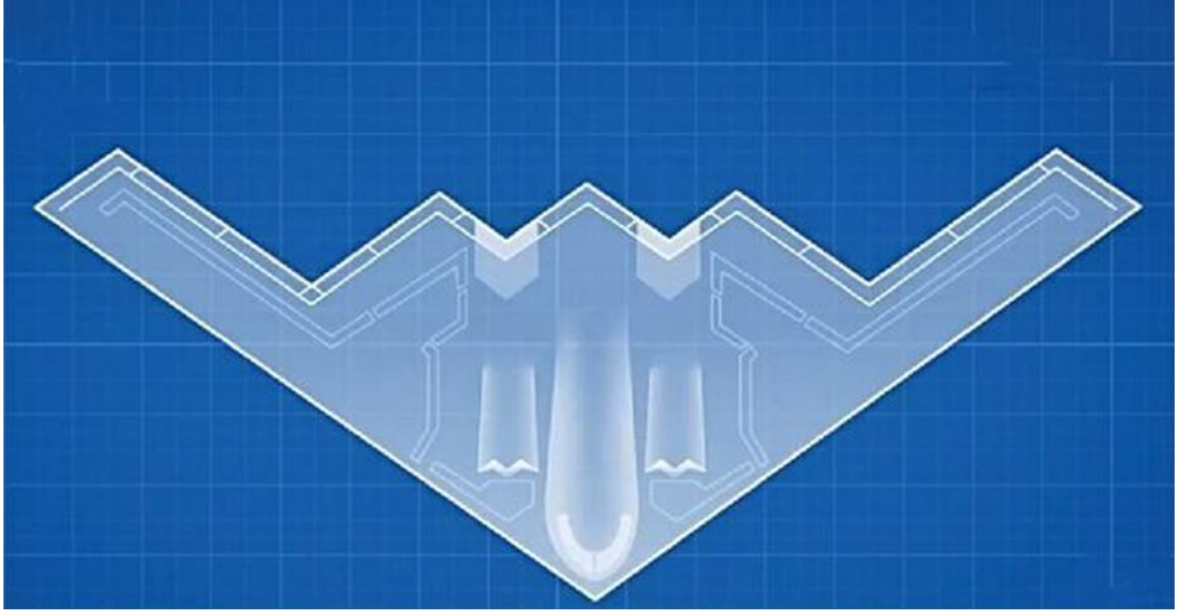


*1999 yılında Sırbistan'da düşürülen F-117 Nighthawk savaş uçağının kalıntıları. Pentagon yetkililerine göre Çin, kendi görünmezlik teknolojisini geliştirmek için bu uçağın kalıntılarından faydalanmış olabilir. Hava araçları için görünmezlik teknolojisini geliştirmek, bu kabiliyeti hükümsüz kılmak için gereken teknolojinin geliştirilmesine de zemin hazırlamış olabilir. Foto: Vladimir Dimitrijevic Tanjug/Associated Press*

Bu problemi çözmek amacıyla bir karış uzunluğunda bir optik fiber gibi bir fotonik gecikme hattı faz modülatörü (PM) önüne, biline bir referans optik sinyal zaman gecikmesine dâhil edilebilir. Bu zaman gecikmesi ( $\Delta\tau$  olarak gösterilen), LFM sinyaline karşılık gelen kablolu transmisyon zaman gecikmesinin ( $\Delta\tau'$ ) bir kısmını dengelemek amacıyla kullanılır ve böylece düşük frekans de-chirped sinyal  $\Delta f=4k(\Delta\tau-\Delta\tau')$  elde edilir.

Gerçek hedef mesafesi hesaplanırken ilave  $c\Delta\tau'/2$  mesafesi eklenmelidir. Bu yöntemle, uzun menzilli hedef tespitinde gerçek zamanlı işleme, gönderilen sinyal gücü yeteri kadar yüksek olduğunda hâlâ başarılabilir. Bunun yanı sıra, de-chirped sinyal frekansını düşürmek için bu fotonik gecikme hattı tekniği kullanılarak, gerçek zamanlı hedef tespit gereksinimi rahatlatılabilir.

Bir radarın mesafe ayırma yeteneği çalışma bant genişliği ile ilgilidir. Konvansiyonel K-bant radarlar genellikle birkaç yüz megahertz bant genişliğine sahiptir ve mesafe ayırma yetenekleri de yaklaşık olarak 15 cm'dir (21,22). Trilyon hertz frekansında bir radar, yaklaşık olarak 1,5 cm'lik (23) bir mesafe ayırımı yapabilir, fakat performansı karmaşık elektrik devreleri ve çalışma bant genişliği nedeniyle sınırlıdır.



*Günümüzde görünmezlik teknolojisine sahip J-20 (Çin), B-2, F-22, F-35 (ABD) savaş uaqları mikro dalga foton radarlara karşı ırlıplak bir durumdadır. İllüstrasyon: Errymath*

Foton esaslı bir radarın geçmişte gerçekleştirilen kabiliyet gösterimlerinde gerçekleştirilemeyen çok geniş bir çalışma bant genişliği potansiyeli vardır. Örneğin Referans (11)'de bahsedilen foton esaslı eşevreli radar, 7,5 metre mesafe ayırma yeteneğine karşılık gelen azami 200 MHz bant genişliğine sahiptir. Bizim deneysel gsterimimizde 8-GHz bant genişliği, anten çiftinin bant genişliği tarafından sınırlandırılmıştır. Önerilen foton sinyal oluşturma ve de-chirp prosesine gelince, çalışma bant genişliği sadece elektro optik modülatörler ve foto detektörler tarafından sınırlandırılmıştır. Bu nedenle önerilen radarın, 1 cm'nin altında ultra yüksek mesafe ayırmayı mümkün kılan gigahertz seviyesinin onlarca hatta yüzlerce kat bant genişliğinde bir çalışma potansiyeli vardır.

## **Sonuç**

Kompakt bir konfigürasyonda, optik sinyal oluşumu ve de-chirp prosesinin gerçekleştirildiği, foton esaslı gerçek zamanlı yüksek znrlkl bir radar önerdik ve çalıştığını gösterdik. Optik frekansın dört katına çıkarılmasıyla oluşturulan LFM sinyali yüksek znrlkl radarlarda arzu edilen bir gereksinim olan çok geniş bir bant genişliğine sahiptir. Bunun yanı sıra, yansayan ekoların fotonik de-chirping işlemi

elektriksel frekans dönüştürme, yüksek hızlı analog sayısal dönüştürücü kullanımına gerek bırakmayarak radar alıcılarında geniş bantlı sinyalin gerçek zamanlı işlenmesini mümkün hale getirmiştir. Önerilen yöntemin performansı; K-bantta çalışan, 8-GHz bant genişliğine sahip bir radar kurularak sorgulanmıştır. Deneysel sonuçlar, gerçek zamanlı ultra yüksek mesafe çözünürlüklü hedef tespitinde gelecek vadeden bir çözüm olarak önerilen radar taslağının yapılabileceğini ve iyi performansını doğrulamaktadır.

## Yöntemler

### Optik Frekansın Dört Kat Artırımının Gerçekleştirilmesi

DPMZM'ye beslenen optik alanın  $E_{in}t = E_c \cos(2\pi f_c t)$  olduğunu kabul ettik, denklemde  $E_c$  optik alanın genliği ve  $f_c$  de optik taşıyıcının frekansıdır. İki adet alt MZM'ye (MZM-a ve MZM-b) uygulanan besleme sinyalleri sırasıyla  $V_1(t) = V_{IF} \cos(2\pi f_{IF} t)$  ve  $V_2(t) = V_{IF} \cos(2\pi f_{IF} t + \frac{\pi}{2})$ 'dir. MZM-a ve MZM-b'nin her ikisi de azami transmisyon noktasına, MZM-c ise asgari transmisyon noktasına eğilimlidir. Bu şartlar altında DPMZM çıkışındaki optik alan aşağıdaki formülle bulunur (24):

$$E_{DPMZM}(t) = \frac{1}{2} E_c \left\{ \cos(2\pi f_c t) \cos[m \cos(2\pi f_{IF} t)] - \cos(2\pi f_c t) \cos \left[ m \cos(2\pi f_{IF} t + \frac{\pi}{2}) \right] \right\} \quad (4)$$

Denklemde modülasyon endeksi "m"  $\pi V_{IF}/2V_{\pi}$ 'e eşittir ve  $V_{\pi}$  de her iki alt MZM'nin yarı dalga voltajıdır. Jacobi-Anger açılımına dayanarak (4) nolu denklem aşağıdaki şekilde genişletilebilir:

$$E_{DPMZM}(t) = E_c \sum_{n=1}^{\infty} J_{4n-2}(m) \times \{ \cos[2\pi(f_c + (4n-2)f_{IF})t] + \cos[2\pi(f_c - (4n-2)f_{IF})t] \} \quad (5)$$

Denklemde  $J_n$ , "n" düzeninin ilk örneğidir. "m", tipik  $(0, \pi)$  aralığında iken 2'den büyük optik yan bantlar önemli hatalar olmadan ihmal edilebilir ve böylece optik alan aşağıdaki denklemde görüldüğü gibi daha da basitleştirilebilir:

$$E_{DPMZM}(t) = -E_c \{ J_2(m) \cos[2\pi(f_c + 2f_{IF})t] + J_2(m) \cos[2\pi(f_c - 2f_{IF})t] \} \quad (6)$$

(6) nolu denklemde sadece  $\pm 2$ 'nci düzen modülasyon yan bantları mevcuttur. Bu optik sinyal bir foto detektöre gönderildiğinde elde edilen elektrik sinyali  $4f_{IF}(t)$  frekansında olacak ve frekansı dört kat artırılmış bir LFM sinyali oluşturulacaktır.

### Deneyel Komponentler

Işık kaynağı olarak 1550,51 nm dalga boyunda ve çıkış gücü 16 dBm olan bir lazer diyot (TeraXion. Inc.) kullanılmıştır. DPMZM (Fujitsu FTM7962EP) 22 GHz 3-dB bant genişliği ve 22 GHz'de 3,5 V yarı-dalga voltajına sahiptir. Faz modülatörü (EOSPACE Inc.) 40 GHz bant genişliğine sahiptir ve yarı-dalga voltajı yaklaşık olarak 3,5 voltur. IF-LFM sinyalinin oluşturulması için azami örnekleme oranı 65 GSa/s olan bir rasgele dalga şekil jeneratörü (Keysight 8195A) uygulanmıştır. Gönderilen ve alınan sinyallerin gücünü artırmak amacıyla 40-GHz bant genişliği

ve kazancı 26 dB olan elektriksel yükselteçler (SHF 806E) kullanılmıştır. LFM sinyal oluşturulması için kullanılan foto detektör (PD1) 40 GHz bant genişliğine ve de-chirping işlemi için kullanılan foto detektör (PD2) 10 GHz bant genişliğine sahiptir. Faz modülasyonu sonrasında EDFA (Amonics Ltd. Mini EDFA) yaklaşık olarak 10 dB optik güç kazancı sağlamaktadır. OBPF, bant genişliği 50 pm ile 800 pm arasında ayarlanabilen ve transmisyon kenar eğimi 500 dB/nm olan bir C-Bant optik filtresidir (Yenista XTM-50). Optik spektrum, çözünürlüğü 0.02 nm olan bir optik spektrum çözümleyici (Yokogawa AQ6370C) tarafından ölçülmüştür. Oluşturulan LFM sinyalinin 80-GSa/s örnekleme oranıyla dalga şeklinin ölçülmesi amacıyla gerçek zamanlı bir osiloskop (Keysight DSO-X 92504 A) kullanılmıştır. Bu osiloskop aynı zamanda de-chirped sinyalinin 500 MSa/s örnekleme oranıyla sayısallaştırılması ve gerçek zamanlı spektral analiz için de kullanılmıştır.

## Referanslar

1. Skolnik, M. Radar Handbook (ed. Roger, S.) Bölüm 17, 17,6–17.10 (McGraw-Hill, 2008).
2. Richards, M., Scheer, J. ve Holm, W. Principle of Modern Radar: Basic Principle (ed. Mark, A. R.) Bölüm 13, 472–487 (SciTech Publishing, 2010).
3. Ghelfi, P. et al. Photonics in radar systems. IEEE Microw. Mag. 16, 74–83 (2015).
4. Capmany, J. & Novak, D. Microwave photonics combines two worlds. Nature Photon. 1, 319–330 (2007).
5. Yao, J. Microwave photonics, IEEE. J. Lightwave Technol. 27, 314–335 (2009).
6. Pan, S. et al. Satellite Payloads Pay Off. IEEE Microw. Mag. 16, 61–73 (2015).
7. Gao, H. et al. A simple photonic generation of linearly chirped microwave pulse with large time-bandwidth product and high compression ratio. Opt. Express 21, 23107–23115 (2013).
8. Li, W. & Yao, J. Generation of linearly chirped microwave waveform with an increased time-bandwidth product based on a tunable optoelectronic oscillator. J. Lightw. Technol. 32, 3573–3579 (2014).
9. Zhou, P., Zhang, F., Guo, Q. & Pan, S. Linearly chirped microwave waveform generation with large time-bandwidth product by optically injected semiconductor laser. Opt. Express 24, 18460–18487 (2016).
10. Zhang, H., Zou, W. & Chen, J. Generation of a widely tunable linearly chirped microwave waveform based on spectral filtering and unbalanced dispersion. Opt. Lett. 40, 1085–1088 (2015).
11. Ghelfi, P. et al. A fully photonics-based coherent radar system. Nature 507, 341–345 (2014).
12. Strutz, S. & Williams, K. An 8–18-GHz all-optical microwave downconverter with channelization. IEEE Trans. Microw. Theory Tech. 49, 1992–1995 (2001).

13. Pagan, V., Haas, B. ve Murphy, T. Linearized electrooptic microwave downconversion using phase modulation and optical filtering. *Opt. Express* 19, 883–895 (2011).
14. Chan, E. & Minasian, R. Microwave photonic downconverter with high conversion efficiency. *J. Lightw. Technol.* 30, 3580–3585 (2012).
15. Zou, W. et al. All optical central-frequency-programmable and bandwidth tailorable radar. *Sci. Rep.* 6, 19786 (2016).
16. Richards, M. *Fundamentals of Radar Signal Processing* (ed. Mark, A. R.) Bölüm 8, 390–399 (McGraw-Hill, 2005).
17. Zhang, F. et al. Photonics-based broadband radar for high-resolution and real-time inverse synthetic aperture imaging. *Opt. Express* 25, 16274–16281 (2017).
18. Wang, T. et al. High-spectral-purity millimeter-wave signal optical generation. *J. Lightw. Technol.* 27, 2044 (2009).
19. Fu, Y. et al. Mach-Zehnder: a review of bias control techniques for Mach-Zehnder modulators in photonic analog links. *IEEE Microw. Mag.* 14, 102–107 (2013).
20. Zhu., D. et al. Phase noise measurement of wideband microwave sources based on a microwave photonic frequency down-converter. *Opt. Lett.* 40, 1326–1329 (2015).
21. Ozturk, H. et al. Predistorter based K-band FMCW radar for vehicle speed detection, *Proceedings of the 17th International Radar Symposium* (2016).
22. Zhang, H. et al. 24 GHz software-defined radar system for automotive applications, *Proceedings of the 10th Europe Conference on Wireless Technology*, 138–141 (2007).
23. Yang, Q. et al. Experimental research on imaging of precession targets with THz radar. *Electron. Lett.* 52, 2059–2061 (2016).
24. Lin, C. et al. Optical millimeter-wave signal generation using frequency quadrupling technique and no optical filtering. *IEEE Photon. Technol. Lett.* 20, 1027–1029 (2008).

Bu çalışma Çin Ulusal Doğal Bilim Kurulu tarafından desteklenmiştir. Bu makale 23 Ekim 2017 tarihinde yayınlanmıştır. Bütün yazarlar bu çalışmaya yoğun bir şekilde katılmıştır. F. Zhang ve S. Pan temel fikri ilk ortaya atanlardır. Q. Guo ve F. Zhang deneyleri ve teorik analizi gerçekleştirmiştir. Makalenin kaleme alınmasına F. Zhang ve S. Pan katkı sağlamıştır.

*Bu makaleye açık erişim; orijinal yazarlar ve kaynak referans gösterildiğinde ve Creative Commons lisansına bir link verildiğinde ve değişiklik yapıldığında gösterildiğinde; kullanma, paylaşma, uyarılama, dağıtım ve herhangi bir araç veya formatta yeniden üretime izin veren Creative Commons Attribution 4.0 International Licence altında lisanslandırılmıştır. Bu makaledeki görüntüler ve üçüncü taraflara ait materyaller makalenin Creative Commons lisansında gösterilmiştir. Materyal, makalenin Creative Commons lisansına dâhil edilmemiş ise ve kullanılma niyeti izin verilen yetkileri aşıyor ise direkt olarak telif hakkı sahibinden izin alınmalıdır.*

Lisansın kopyasını görüntülemek için <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/> linkini ziyaret edin.

<https://www.nature.com/articles/s41598-017-14306-y>

Ercan Caner Sun Savunma Net sitesinin kurucularındandır. Twitter [@ercancaner1963](https://twitter.com/ercancaner1963) üzerinden takip edebilirsiniz.