BAŞVURU KURSU - TÜM YETİŞKİNLER İÇİN

ADS-B nedir ve nasıl çalışır

On iki bölüm. Havacılık veya radyo hakkında ön bilgi gerekmez; çözümlü örnekler için ortaokul ve lise matematiği yeterlidir ve bu örnekler konunun akışını kaybetmeden atlanabilir. Okuma süresi yaklaşık 50 dakikadır.

Öğren - https://radar.dataero.eu/tr/learning/course 2026-11-21

İÇİNDEKİLER

BÖLÜM 1 Sorun: kimsenin göremediği uçaklarla dolu bir gökyüzü
BÖLÜM 2 ADS-B'den önce: uçakları radarla bulmak
BÖLÜM 3 Fikir: uçak bize kendisi söylesin
BÖLÜM 4 Uçak nerede olduğunu nasıl bilir
BÖLÜM 5 Bir mesajın anatomisi
BÖLÜM 6 - FİZİK Dalga: görünmez ışık olarak radyo
BÖLÜM 7 - FİZİK Menzil: Dünya'nın eğriliği ve sinyalin zayıflaması
BÖLÜM 8 - FİZİK Antenler: 27 santimetrelik bir dalgayı yakalamak
BÖLÜM 9 Alma ve kod çözme
BÖLÜM 10 Tek bir alıcıdan bir kıtanın haritasına
BÖLÜM 11 Ne için kullanılır ve nerede yetersiz kalır
BÖLÜM 12 Kısa bir tarihçe
Sözlük
SIRADA Teoriden pratiğe: alıcıyı kurun

BÖLÜM 1

Sorun: kimsenin göremediği uçaklarla dolu bir gökyüzü

Sıradan bir hafta içi gününde Avrupa hava sahasını yaklaşık 30 000 uçuş geçer. Seyir halindeki bir yolcu uçağı saniyede yaklaşık 250 metre, yani saatte 900 km hızla ilerler; birbirine doğru giden iki uçak her saniye yarım kilometre yaklaşır. Pencereden dışarı bakan bir pilot bunların neredeyse hiçbirini görmez: 10 000 metrede diğer uçaklar birer noktacıktır ve zaten çoğunu bulutlar gizler. Gökyüzü, üzerine hiçbir yol çizilmemiş üç boyutlu bir yol ağıdır ve üzerindeki trafik hem hızlı hem de görünmezdir.

Hava trafik kontrolü bu trafiği birbirinden ayrı tutmak için vardır. Kurallar prensipte basittir: kontrollü hava sahasında uçaklar dikeyde en az 1 000 fit (yaklaşık 300 metre) ya da yatayda belirli bir mesafe ayrı tutulur; bu mesafe radar kapsamına yakın yerlerde genellikle 5 deniz mili (9,3 km), okyanuslar üzerinde ise çok daha fazladır. Kuralları uygulayabilmek için bir kontrolörün sektördeki her hava aracının konumunu sürekli ve güvenilir biçimde bilmesi gerekir: bir dakika önce nerede olduğunu değil, şu anda nerede olduğunu, ne kadar yüksekte olduğunu ve hangi yöne gittiğini. Bu kursun bütün konusu, bu bilginin nasıl elde edildiğidir. Bunun teknik adı **gözetim**dir.

Akılda tutulacak bir sayı
900 km/sa hızla bir uçak bir dakikada 15 km, bir saniyede 250 m yol alır. Yavaş güncellenen ya da büyük hata payı olan her gözetim yöntemi, kontrolörü tam da önemli olan bu mesafelerde tahmin yürütmek zorunda bırakır.

BÖLÜM 2

ADS-B'den önce: uçakları radarla bulmak

1930'ların sonunda geliştirilen ve İkinci Dünya Savaşı sırasında olgunlaşan ilk yanıt **birincil radar** oldu. Dönen büyük bir anten, kısa ve çok güçlü bir radyo enerjisi darbesi gönderir. Darbe bir uçağa çarptığında, çok küçük bir kısmı geri yansır. Radar, darbenin çıkışı ile yankının dönüşü arasındaki süreyi ölçer; radyo dalgaları ışık hızıyla, 300 000 km/s ile yol aldığından bu süre mesafeyi verir. Antenin baktığı yön de kerterizi verir. Birincil radar son derece bağımsızdır: uçağın hiçbir donanıma ihtiyacı yoktur, bu yüzden ordu tarafından hâlâ kullanılır. Ancak gerçek zayıflıkları vardır. Uzaktaki bir uçaktan gelen yankı olağanüstü zayıftır, bu nedenle verici devasa olmalıdır. Yankı, uçağın kim olduğu ya da ne kadar yüksekte olduğu hakkında hiçbir şey söylemez. Üstelik antenin bir turu tamamlaması birkaç saniye sürer, dolayısıyla her uçak yalnızca 4 ila 12 saniyede bir görülür ve bu sürede 3 km'ye kadar yol almış olur.

İkinci yanıt olan **ikincil gözetim radarı** (SSR), uçağı sürece katılan bir taraf hâline getirdi. Bir yer istasyonu 1030 MHz üzerinden bir soru, yani bir *sorgulama* gönderir. Uçaktaki küçük bir telsiz olan **transponder** bu soruyu duyar ve kendi güçlü sinyaliyle 1090 MHz üzerinden yanıt verir. Yanıt yansıtılmak yerine yayınlandığı için radar yankısından milyonlarca kat daha güçlüdür; bir bilgisayar tarafından üretildiği için de bilgi taşıyabilir. En eski biçimde (Mode A) yanıt, kontrolörün atadığı dört haneli bir kimlik kodu içerir; Mode C'de ayrıca uçağın irtifasını da içerir. 1980'lerde **Mode S** ("S", İngilizce "selective", yani seçici anlamında) geldi: bu sistemde her transponderin benzersiz bir 24 bitlik adresi vardır, tek tek sorgulanabilir ve 56 ya da 112 bitlik veri mesajlarıyla yanıt verebilir. Bu sayıyı, 1090 MHz'i, ve bu terimi, Mode S'yi aklınızda tutun: ADS-B doğrudan her ikisinin üzerine kuruludur.

İkincil radar büyük bir gelişmeydi, ancak öncülüyle iki sınırlamayı hâlâ paylaşır. Uçak yalnızca sorulduğunda konuşur; bu yüzden yerde hâlâ menzil içinde sorgulama yapan bir istasyona ihtiyaç vardır ve bu da okyanusları, çölleri ve sıradağları dışarıda bırakır. Ayrıca istasyon, yanıtın hangi yönden geldiğini bilmek için yine dönen bir antene ihtiyaç duyar; dolayısıyla her uçak hâlâ her turda yalnızca bir kez görülür ve kontrolörün ekranında düzgünce hareket eden bir uçak yerine birkaç saniyede bir sıçrayan bir nokta görünür. Bunu aşmak için temelden farklı bir şey gerekiyordu: uçağın, kendisine sorulmadan ve yerde hiçbir şeyin ölçülmesine gerek kalmadan konumunu bildirmesinin bir yolu.

BÖLÜM 3

Fikir: uçak bize kendisi söylesin

1990'lara gelindiğinde, farklı bir yaklaşımı mümkün kılan iki teknoloji olgunlaşmıştı. Uydu navigasyonu, uygun donanıma sahip her hava aracına kendi konumunu doğru biçimde bilme imkânı verdi; bu doğruluk, herhangi bir radarın yerden ölçebileceğinden çok daha iyiydi. Mode S transponder ise 1090 MHz üzerinden veri mesajı gönderebilen bir telsizi zaten sağlıyordu. İkisini bir araya getirdiğinizde mantık karşı konulmazdır: yerin uçağın nerede olduğunu ölçmek için uğraşması yerine, bunu zaten bilen uçak bunu düzenli aralıklarla herkese söylesin. İşte ADS-B budur ve adındaki dört kelime onun tam bir tanımıdır.

Otomatiktir (automatic): hiçbir şey yayını tetiklemez. Transponder, menzil içinde bir yer istasyonu olsun ya da olmasın, pilot bir şey yapsın ya da yapmasın, kendi programına göre, saniyede yaklaşık iki kez yayın yapar; hatta pilot, yasak olan transponderi kapatma dışında, uçuş sırasında bunu durduramaz. **Bağımlıdır** (dependent): mesajdaki her bilgi uçağın kendi donanımından gelir; konum uydu alıcısından, irtifa basınç altimetresinden alınır ve yer hiçbir şey ölçmez, kendisine söylenene güvenir. Bir **gözetim**

(surveillance) sistemidir: amacı, hava trafik kontrolü ve yakındaki uçaklar için başkalarının uçağın nerede olduğunu bilmesini sağlamaktır; bu, uçağın kendi konumunu bilmesi olan navigasyondan ve pilotla konuşmak olan haberleşmeden farklıdır. Ve bir **yayındır** (broadcast): mesajın alıcısı, onayı ve şifrelemesi yoktur; menzil içinde alıcısı olan herkes, ister bir kontrol merkezi, ister başka bir yolcu uçağı, ister bir okul olsun, tam olarak aynı şeyi duyar.

"Bağımlı" kelimesi mühendisleri en çok kaygılandıran ve açıklanmayı en çok hak eden kelimedir. Radar bağımsız bir ölçüm yapar: uçağın aletleri yanlışsa radar bunu umursamaz. ADS-B ise uçağın kendi navigasyon sisteminin her hatasını devralır; bu sistem yanıltılır ya da arızalanırsa, yayınlanan konum aynı kesinlikle yanlış olur. Bu yüzden her ADS-B mesajı, konumun yanında uçağın kendi konumuna ne kadar güvendiğine dair bir bildirim de taşır (5. bölümde karşılaşacağımız bütünlük ve doğruluk kategorileri) ve bu yüzden radar kapatılmamıştır.

"Yayın" kelimesi ise bu kursu mümkün kılan kelimedir. Mesajlar herkese açık olarak gönderildiği için yalnızca hava trafik kontrolü tarafından değil, 1090 MHz'e ayarlanmış her alıcı tarafından, bir okulun çatısına koyabileceğiniz alıcı dahil, duyulur. Aynı özellik, 11. bölümde ele alınan sistemin başlıca sınırlamasının da kaynağıdır: herkesin okuyabildiği bir mesaj, herkesin taklit edebileceği bir mesajdır da.

BÖLÜM 4

Uçak nerede olduğunu nasıl bilir

ADS-B'deki her şey uçağın kendi konumunu bilmesine dayanır; bu nedenle bu bölüm uydu navigasyonu hakkındadır. Genel terim **GNSS**, yani Küresel Navigasyon Uydu Sistemi'dir; en bilineni Amerikan GPS'tir, Avrupa'nın Galileo'su, Rusya'nın GLONASS'ı ve Çin'in BeiDou'su da aynı prensiple çalışır. Her sistem, uçakların çok üzerinde, yaklaşık 20 000 km irtifada yörüngede dönen 24 ila 30 kadar uydudan oluşan bir takımyıldızdır ve her uydu, saniyenin milyarda birkaçı hassasiyetinde bir atom saati taşır. Her uydu sürekli olarak, özünde şunu söyleyen bir radyo sinyali yayınlar: "Ben N numaralı uyduyum, konumum şudur ve bunu gönderdiğim an tam olarak T'dir".

Uçaktaki alıcı bu sinyali biraz sonra duyar, çünkü radyo dalgalarının yol alması zaman alır: 300 000 km/s hızla uydudan gelen 20 000 km yaklaşık 67 binde bir saniye sürer. Alıcı, mesajdaki zaman damgasını varış zamanıyla karşılaştırır. Aradaki fark, ışık hızıyla çarpıldığında o uyduya olan mesafeyi verir. Tek bir mesafe, alıcıyı o uydunun çevresindeki bir kürenin üzerinde bir yere yerleştirir. İki küre bir çemberde kesişir; üç küre ise iki noktada kesişir ve bunlardan biri genellikle saçmadır (yerin çok altında ya da uzayın derinliklerinde) ve elenir. Yani alıcının kusursuz bir saati olsaydı üç uydu yeterli olurdu.

Ama kusursuz bir saati yoktur. Bir atom saati on binlerce avroya mal olur ve sığmaz; alıcıda, gereken zamanlama hassasiyetinden çok daha fazla sapabilen ucuz bir kuvars saat bulunur. İşte zarif kısım burada. Alıcı kendi saat hatasını, üç konum koordinatının yanında dördüncü bir bilinmeyen olarak ele alır ve dördüncü bir uyduyu dinler. Dört denklem, dört bilinmeyen: alıcı konumunu çözer ve bir yan ürün olarak kendi saatini birkaç on nanosaniye hassasiyetle düzeltir. Bu yüzden bir uydu alıcısı en az dört uyduyu görmelidir ve bu yüzden her GNSS alıcısı aynı zamanda, tesadüfen, binadaki en hassas saatlerden biridir.

Büyüklükler üzerinde durmaya değer, çünkü uydu navigasyonunun aslında geometrinin ikinci planda kaldığı bir zaman ölçme işi olduğunu açıklarlar. Işık bir nanosaniyede 30 santimetre, bir mikrosaniyede 300 metre yol alır; dolayısıyla saniyenin milyonda biri kadar bir zamanlama hatası 300 metrelik bir

konum hatasına dönüşür ve modern bir alıcının birkaç metrelik doğruluğu yaklaşık on nanosaniye düzeyinde bir zamanlamaya karşılık gelir. Somut bir örnek alalım. Bir uydu, sinyale 12:00:00,000 000 000 zaman damgasını vurur; uçağın alıcısı onu 12:00:00,070 000 000'da duyar. Yolculuk süresi 0,070 s'dir, dolayısıyla mesafe 0,070 x 300 000 km/s = 21 000 km'dir. Alıcının kendi saati yalnızca bir mikrosaniye ileri olsaydı, 21 000,3 km, yani 300 metre fazla hesaplardı ve aynı hata diğer tüm uyduların mesafelerine de sızardı. Dördüncü uydunun ortaya çıkarıp ortadan kaldırdığı şey tam da bu ortak hatadır.

Bir değil, iki irtifa

Uydular, Dünya'nın matematiksel yüzeyinin üzerindeki yüksekliği, yani *geometrik* irtifayı verir. Oysa bir uçağın hava trafiği amaçlarıyla yayınladığı irtifa bu değildir. Bu, gövdedeki statik port adı verilen küçük bir açıklıkla ölçülen, uçağın dışındaki hava basıncından türetilen **barometrik irtifadır**. Hava basıncı yükseklikle bilinen bir şekilde düşer (yere yakın yerlerde kabaca her 8 metrede 1 hPa, daha yukarıda daha yavaş) ve dünyadaki her altimetre, deniz seviyesinde 1013,25 hPa referanslı aynı standart atmosferi kullanarak basıncı yüksekliğe çevirir. Basıncın alışılmadık olduğu bir günde her uçağın barometrik irtifası aynı miktarda yanlıştır ve asıl mesele de budur: ayırma için önemli olan denizden gerçek yükseklik değil, "uçuş seviyesi 350" gösteren uçakların, "uçuş seviyesi 340" gösteren bir uçaktan gerçekten 300 metre uzakta olmasıdır. ADS-B, konum mesajlarında barometrik irtifayı 25 fitlik (7,6 m) adımlarla yayınlar ve bunun uydu yüksekliğiyle farkını ayrıca yayınlar; böylece bir alıcı ikisini de elde edebilir.

BÖLÜM 5

Bir mesajın anatomisi

Dünya genelinde yolcu uçaklarının kullandığı ADS-B mesajı, **extended squitter** (genişletilmiş squitter) adı verilen bir Mode S yayınıdır; "squitter", bir yanıt olarak değil kendiliğinden gönderilen yayın için kullanılan eski bir radar argosudur, "extended" (genişletilmiş) ise 112 bit ile orijinal Mode S yanıtının iki katı uzunlukta olmasından gelir. Mühendisler "1090 MHz extended squitter" için "1090ES" yazar. Her yayın toplam 120 mikrosaniye sürer: bir alıcının mesajın başlangıcını tanımasını ve saatini senkronize etmesini sağlayan, dört darbeden oluşan sabit bir desen olan 8 mikrosaniyelik bir *önsöz* (preamble) ve ardından mikrosaniyede bir bit hızıyla 112 veri biti.

Bir bit nasıl gönderilir: darbe konum modülasyonu

Her bir mikrosaniyelik bit aralığı iki yarıya bölünür. İlk yarıda bir radyo enerjisi darbesi ve ikinci yarıda sessizlik 1 anlamına gelir; önce sessizlik sonra darbe ise 0 anlamına gelir. Dolayısıyla veri ne olursa olsun bit başına tam olarak bir darbe vardır ve alıcının yalnızca her aralığın hangi yarısının daha güçlü olduğuna karar vermesi gerekir. Darbe konum modülasyonu adı verilen bu yöntem, bir sinyalin transponderden uzaktaki bir antene giderken maruz kaldığı gürültü ve sönümlenme türlerine karşı dayanıklıdır ve kodunun çözülmesi ucuzdur.

Darbe konum modülasyonunda dört bit: 1, 0, 1, 1



Her aralık 1 mikrosaniyedir. İlk yarıda darbe: 1. İkinci yarıda darbe: 0.

112 bit

DF 5 bit downlink formatı	CA 3 bit yetenek	ICAO adresi 24 bit benzersiz uçak kimliği	ME - yük 56 bit ilk 5 bitindeki tür koduna göre konum, irtifa, hız, çağrı işareti veya durum	PI 24 bit hata denetimi (CRC)

İlk beş bit olan downlink formatı, bunun ne tür bir Mode S mesajı olduğunu söyler; 17 değeri "Mode S transponderden gelen ADS-B" anlamına gelir. 24 bitlik **ICAO adresi**, uçağın tescil edildiğinde atanan kalıcı kimliğidir: 2 üzeri 24, yani 16 777 216 olası adres vardır ve bunlar BM'nin sivil havacılık kuruluşu ICAO tarafından devletlere bloklar hâlinde tahsis edilir. Örneğin Belçika uçakları onaltılık sistemde 448000 ile 44FFFF arasındaki adresleri taşır. Eski Mode A'nın dört haneli kodunun aksine bu adres asla değişmez ve asla paylaşılmaz; böylece bir alıcı, daha ilk mesajdan hangi uçağı duyduğundan emin olabilir.

56 bitlik **ME** alanı asıl içeriktir ve ilk beş biti olan *tür kodu*, geri kalanın ne anlama geldiğini söyler. 1 ila 4 arasındaki tür kodları, BEL1234 veya RYR7KL gibi uçağın çağrı işaretini altı bitlik sekiz karakter olarak taşır. 9 ila 18 arasındaki kodlar barometrik irtifayla birlikte havadaki konumu taşır; 20 ila 22 aynı bilgiyi uydu irtifasıyla taşır. 19 numaralı kod hızı taşır: doğu-batı ve kuzey-güney bileşenlerine ayrılmış yer hızı, dikey hız ve barometrik irtifa ile uydu irtifası arasındaki fark. 28, 29 ve 31 numaralı kodlar durum bilgisini taşır: acil durum kodları, seçilen irtifa ve yayınlanan konuma ne kadar güvenilebileceğini söyleyen bütünlük ve doğruluk kategorileri (örneğin 8 değerindeki bir "NIC", gerçek konumun yüksek olasılıkla bildirilen konumun 185 m yakınında olduğunu garanti eder).

Son 24 bit, önceki 88 bitten sabit bir polinom bölmesiyle hesaplanan bir sayı olan **döngüsel artıklık denetimidir** (CRC). Alıcı, çözdüğü bitler üzerinde hesaplamayı tekrarlar; sonuç uyuşmazsa en az bir bit yolda bozulmuştur ve mesaj atılır. Bir mikrosaniyelik bir darbe gürültüye ya da başka bir uçaktan gelen üst üste binen bir mesaja kolayca kaybolabileceğinden, bozuk konumları kontrolörün ekranından uzak tutan şey bu denetimdir. Bir alıcının kaydedeceği şekliyle gerçek bir mesaj şöyle görünür:

```
8D 4840D6 202CC371C32CE0 576098
```

8D: downlink formatı 17, yetenek 5. 4840D6: ICAO adresi, Hollanda tescilli bir uçak. 20...: tür kodu 4, KLM1023 çağrı işaretine çözülen bir kimlik mesajı. 576098: hata denetimi.

Dünya'yı 34 bite sığdırmak

Bir konum mesajında enlem için yalnızca 17, boylam için 17 bit vardır. Bu, tüm dünya çevresinde 131 072 adım, ekvatorda her biri yaklaşık 300 m eder: yeterli olmaktan çok uzak. ADS-B bunu **kompakt konum raporlama** (CPR) ile çözer. Dünya bölgelere ayrılır; 17 bit, bir bölge içinde çok hassas bir konum (yaklaşık

5 m'ye kadar) verir, ancak hangi bölge olduğunu vermez. Uçak, "çift" ve "tek" mesajlar olmak üzere birbirinden biraz farklı iki bölge ızgarası arasında dönüşümlü olarak geçiş yapar ve her birinden birer tane duymuş bir alıcı, bölgeyi kesin olarak belirleyebilir. Bunu yaptıktan sonra uçağı izlemek için tek bir mesaj yeterlidir, çünkü uçak yarım saniyede başka bir bölgeye sıçramış olamaz. Bu, bit maliyeti olmadan kullanılabilir hassasiyeti iki katına çıkaran zekice bir hiledir.

Ne sıklıkla

Uçuştaki bir transponder saniyede iki kez konum mesajı, saniyede iki kez hız mesajı ve her beş saniyede bir çağrı işaretini gönderir; buna daha uzun aralıklarla gönderilen durum mesajları eklenir, yani toplamda saniyede yaklaşık dört ila beş extended squitter. Her biri 120 mikrosaniye sürer; transponder aslında zamanın binde birinden çok daha azında ADS-B yayını yapar. Saniyenin geri kalanında 1030 MHz üzerindeki radar sorgulamalarını ve diğer uçakların çarpışma önleme sorgularını dinler ve yanıtlar.

BÖLÜM 6 - FİZİK

Dalga: görünmez ışık olarak radyo

Mesaj uçaktan bir **radyo dalgası** olarak çıkar ve bu kurstaki en yararlı fikir, bir radyo dalgası ile bir ışık ışınının aynı şey olduğudur. İkisi de elektromanyetik dalgadır: birlikte salınan ve uzayda ışık hızıyla, c, yani saniyede 299 792 458 metre ya da yaklaşık 300 000 km/s ile yayılan elektrik ve manyetik alanlardan oluşan bir desen. Bir radyo dalgasını yeşil ışıktan, hastanedeki X ışınlarından ya da mutfaktaki mikrodalga fırının mikrodalgalarından ayıran tek şey, alanların ne kadar hızlı salındığıdır: hertz (saniyedeki salınım sayısı) ile ölçülen **frekans**, f.

Dalga sabit bir hızla ilerlediği için frekans, bir tepe ile sonraki arasındaki mesafeyi, yani **dalga boyunu**, lambda'yı belirler. Bir saniyede dalga c metre yol alır ve f salınım tamamlar; dolayısıyla her salınım c / f metre yer kaplar:

$$c = f \times \lambda$$

ADS-B için: lambda = 300 000 000 / 1 090 000 000 = 0,275 m. Uçak ile anteniniz arasındaki dalganın tepeleri 27,5 cm aralıklıdır, bu da kabaca bir okul cetvelinin uzunluğudur.

Dalga	Frekans	Dalga boyu	Not
FM radyo yayını	100 MHz	3 m	Araç antenleri bunun bir kesridir
ADS-B / Mode S	1 090 MHz	27,5 cm	Radar transponder yanıtlarında da kullanılır
Cep telefonu (4G bandı)	1 800 MHz	17 cm	Spektrumda yakın bir komşu
Wi-Fi, mikrodalga fırın	2 450 MHz	12 cm	Aynı frekans, çok farklı güç
Görünür yeşil ışık	560 000 000 MHz	0,000 54 mm	Frekansı yarım milyon kat daha yüksek

Bundan sonraki her şey için iki sonuç önemlidir. Birincisi, dalga ışık olduğundan, bir şey onu bükmedikçe ya da engellemedikçe düz çizgiler hâlinde ilerler ve Dünya'nın içinden geçmez. Bu, 7. bölümün konusu olan sistemin menzilini belirler. İkincisi, dalga boyu 27,5 cm olduğundan, onunla en güçlü etkileşime giren metal yapılar, yani antenler, bu büyüklük mertebesindedir; bu da 8. bölümün konusudur.

Radyo neden ses değildir

Çocuklarda olduğu kadar yetişkinlerde de en yaygın karışıklık radyo ile ses arasındadır; muhtemelen "radyo" ses çıkaran bir kutu olduğu için. Bunlar birbiriyle ilgisiz olgulardır. Ses, havadaki bir basınç dalgasıdır, komşularını iten moleküllerden oluşan bir zincirdir; ilerlemek için bir maddeye ihtiyaç duyar, 340 m/s hızla hareket eder ve boşluğu geçemez. Radyonun hiçbir şeye ihtiyacı yoktur: uydu ile uçak arasındaki boşluğu geçer ve neredeyse bir milyon kat daha hızlı hareket eder. Uçağın motor gürültüsü ve ADS-B mesajı uçaktan aynı anda çıkar; mesaj 20 km uzaktaki bir alıcıya 67 mikrosaniyede ulaşır, ses ise tam bir dakika sonra.

Neden 1090 MHz

Bu frekans bir mirastır. 1950'lerdeki uluslararası anlaşmalar 960 ile 1215 MHz arasındaki bandı havacılık radyo navigasyonuna ayırdı ve 1090 MHz, ikincil radar transponderlerinin yanıt frekansı oldu. ADS-B tasarlanırken, her yolcu uçağında zaten bulunan transponderi yeniden kullanmak yeni bir telsiz kurmaktan çok daha ucuzdu; böylece ADS-B, Mode S transponderin 1090 MHz üzerinden söylediği şeylerden biri hâline geldi. Amerika Birleşik Devletleri'nde yaklaşık 5 500 m'nin altında uçan küçük uçaklar bunun yerine ikinci bir sistem olan 978 MHz üzerindeki UAT'yi kullanabilir; bu yüzden oradaki alıcılar çoğunlukla her ikisini de dinler.

BÖLÜM 7 - FİZİK

Menzil: Dünya'nın eğriliği ve sinyalin zayıflaması

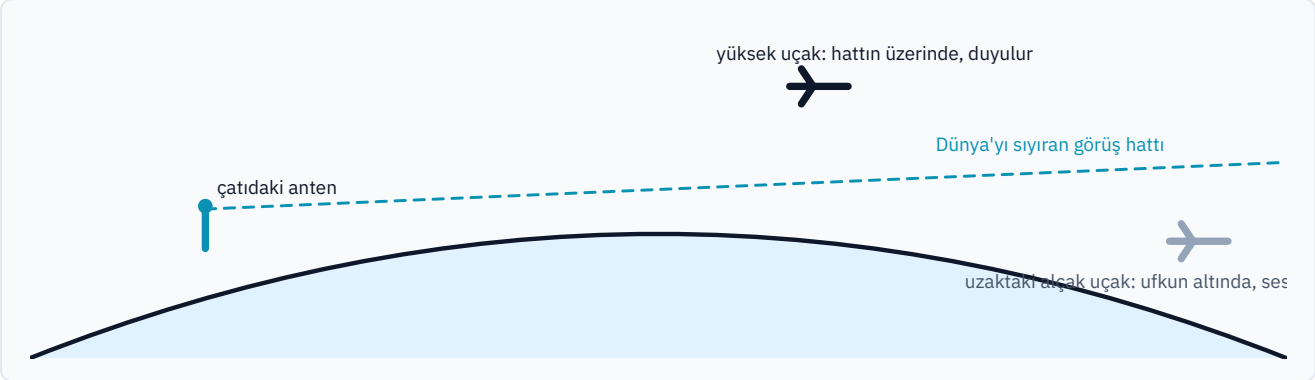
Bir transponder birkaç yüz vatlık tepe gücüyle yayın yapar. Böyle bir sinyal ne kadar uzaktan duyulabilir? Bunu birbirinden oldukça farklı iki şey sınırlar ve bunları ayrı tutmakta fayda vardır: kesin bir sınır çizen geometri ve yumuşak bir sınır çizen güç.

Radyo ufku

1090 MHz'de radyo ışık gibi davranır: düz çizgiler hâlinde ilerler ve Dünya'nın çevresinde bükülmez. Bu nedenle yerdeki bir anten, bir uçağı ancak aralarında yerin içinden geçmeyen düz bir çizgi olduğu sürece duyabilir. Yüzeydeki bir gözlemci için ufuk, bu çizginin Dünya'yı tam sıyırdığı yerdir. Uçak ne kadar yüksekse bu sıyırma noktası o kadar uzaktadır; anten ne kadar yüksekse daha da uzaktadır. Bir küreye teğet geometrisi basit bir sonuç verir: kilometre cinsinden ufuk mesafesi, metre cinsinden yüksekliğin karekökünün yaklaşık 3,57 katıdır. Atmosfer radyoyu hafifçe aşağı doğru büker ve bu da ufku yaklaşık yüzde 15 uzatır; bu nedenle mühendisler bunun yerine 4,12 kullanır:

```
d (km) = 4,12 x ( sqrt(h uçak) + sqrt(h anten) )   yükseklikler metre cinsinden
```

11 000 m'deki uçak, 20 m'lik bir çatıdaki anten: 4,12 x (104,9 + 4,5) = 451 km. 1 000 m'deki uçak, aynı çatı: 4,12 x (31,6 + 4,5) = 149 km. 15 km uzakta yerdeki uçak: aradaki arazi düz ve açık değilse hiç duyulmaz.



Bu, bir alıcının kapsamasının karakteristik şeklini açıklar: yüksekten uçan trafik için 400 km veya daha fazla yarıçaplı bir daire, yaklaşmadaki uçaklar için birkaç on kilometreye küçülür ve yerdeki uçaklar için, hemen yandaki havalimanı dışında, neredeyse hiçbir şey kalmaz. Ayrıca alıcı yüksekliğinin alıcı kalitesinden çok daha önemli olduğunu ve bir tepenin, yüksek bir binanın, hatta sizden uzaklaşacak şekilde yatış yaptığında uçağın kendi kanadının bir sinyali neden anında kesebildiğini de açıklar.

Ters kare yasası

Ufuk içinde sinyal mesafeyle zayıflar. Bir transponder anteni tüm yatay yönlere yayın yapar, bu nedenle gücü giderek büyüyen bir küre üzerine yayılır. Bir kürenin alanı yarıçapının karesiyle büyür; bu yüzden sabit boyutlu bir antene düşen güç mesafenin karesiyle azalır: iki kat uzakta gücün dörtte biri, on kat uzakta yüzde biri. Mühendisler bunu desibel cinsinden bir *yol kaybı* olarak ifade eder ve 400 km üzerinden 1090 MHz için bu yaklaşık 145 dB'dir; yani alınan güç, yayınlanan güçten yaklaşık 10 üzeri 14,5 kat daha küçüktür. 250 vatlık bir darbe, kabaca bir miliwattın milyarda birinin onda biri olarak ulaşır. İyi bir alıcı bunu ancak algılayabilir; geometrik ufuk ile güç sınırının birkaç yüz kilometrede çakışmasının nedeni de budur: sistem böyle tasarlanmıştır.

İki sınır, anlaşılmaya değer bir şekilde etkileşir. Ufuk içinde, yakındaki bir uçaktan gelen güçlü bir sinyal de uzaktaki bir uçaktan gelen zayıf bir sinyal de kusursuz biçimde çözülür, çünkü 5. bölümdeki darbe konum yöntemi yalnızca her bit aralığının hangi yarısının daha güçlü olduğunu sorar, ne kadar güçlü olduğunu değil. Uçak uzaklaştıkça sinyal kullanılabilirliğini yavaş yavaş yitirmez; ufkun yakınında bir yerde ya geometri onu kesene ya da alıcıdaki gürültü onu nihayet bastırana kadar çözülebilir kalır ve iz sona erer. Kapsama haritalarının keskin kenarları olmasının ve bir alıcının duyduğu en uzak uçakların neredeyse her zaman en yüksektekiler olmasının nedeni budur.

BÖLÜM 8 - FİZİK

Antenler: 27 santimetrelik bir dalgayı yakalamak

Anten, geçen bir elektromanyetik dalganın içindeki elektronları uyum içinde hareket ettireceği şekilde biçimlendirilmiş, bir alıcının yükseltebileceği çok küçük bir alternatif akım üreten bir iletken parçasıdır. Vericide bunun tersi olur: uçağın antenindeki bir alternatif akım dalgayı yayar. Bu alışverişin verimi, iletkenin dalga boyuna göre boyutuna bağlıdır. Düz bir tel, yarım dalga boyu uzunluğunda olduğunda en güçlü tepkiyi verir, yani *rezonansa girer*; böylece tel boyunca ileri geri çalkalanan akım, doğal ritminde itilen bir çocuk salıncağı gibi dalganın salınımına tam olarak uyar. 1090 MHz için yarım dalga boyu 13,75 cm'dir.

En yaygın pratik biçim **çeyrek dalga monopoldür**: iletken bir yüzey, yani *toprak düzlemi* (ground plane) üzerinde duran, çeyrek dalga boyu, 6,9 cm uzunluğunda dikey bir çubuk. Toprak düzlemi bir ayna gibi davranır; böylece çubuk ve yansıması birlikte yarım dalga anteni gibi çalışır. Bir uçaktaki ADS-B anteninin gövde üzerinde birkaç santimetre yüksekliğinde kısa bir bıçak olmasının nedeni budur, gövde toprak düzlemi görevi görür; bir hobicinin anteninin de bir teneke kapak üzerindeki kısa bir tel olmasının nedeni budur. Yanlış uzunluktaki bir tel de çalışır, ancak çok daha kötü: "metal kulak" ayarlıdır.

Antenin fizikten kaynaklanan üç özelliği daha vardır ve her birinin görünür bir sonucu vardır. Birincisi **polarizasyondur**. Bir elektromanyetik dalganın elektrik alanı, ilerleme yönüne dik belirli bir yönde salınır ve bir anten yalnızca alanın kendi uzunluğu boyunca olan bileşenine tepki verir. Uçak antenleri dikey olarak monte edilir, bu nedenle ADS-B dalgası dikey polarize olarak ulaşır ve alıcı anten de dikey olmalıdır; yan yatırıldığında neredeyse hiçbir şey duymaz, tıpkı yukarı aşağı sallanan bir ip dalgasının yatay bir yarık tarafından durdurulması gibi. İkincisi **ışıma desenidir**. Dikey bir anten en çok ufka doğru duyarlıdır ve kendi ekseni boyunca hiç duyarlı değildir; böylece üç boyuttaki duyarlılığı, deliğinden anten geçen bir simit şeklindedir. Bu yüzden alıcılar 300 km uzaktaki uçakları zorlanmadan duyar ve tam tepeden geçen bir uçağı birkaç saniyeliğine kaybeder; bu, herhangi bir canlı haritada gözlemlemeye değer bir şeydir. Birkaç rezonans elemanını üst üste dizmek simidi daha da yassılaştırır ve duyarlılığı tepe yönü pahasına uzak uçakların bulunduğu ufka doğru yoğunlaştırır; anten **kazancı** ile kastedilen budur ve bu her zaman duyarlılığın yeniden dağıtılmasıdır, asla yoktan yaratılması değil.

Üçüncüsü, anten ile alıcı arasında bulunanlarla ilgilidir. Anten yalnızca 1090 MHz'i değil, çevredeki her sinyali, birkaç yüz megahertz uzaktaki ve çok daha güçlü olan cep telefonu yayınları dahil, alır; bu nedenle ilk olarak yalnızca havacılık bandını geçiren bir filtre yerleştirilir. Sinyal daha sonra bir kablo boyunca ilerlemek zorundadır ve 1090 MHz'de bir koaksiyel kablo her on metrede sinyalin kabaca yarısını kaybeder. Çözüm, sinyalin yolculuğa dayanacak kadar güçlü olması için kablodan önce, antende bir düşük gürültülü yükseltici kullanmaktır; alıcıda yükseltmek ise kablonun gürültüsünü de sinyalden geriye kalanla birlikte yükseltirdi. Bunlar ayrıntıdır, ama bir okul çatısındaki alıcının ufuktaki uçakları mı yoksa yalnızca yakındakileri mi duyacağına karar veren ayrıntılardır.

BÖLÜM 9

Alma ve kod çözme

Anten ile haritadaki bir nokta arasında beş aşamalı bir zincir vardır. Anten, geçen dalgayı birkaç mikrovoltluk bir alternatif akıma dönüştürür. Bir filtre ve bir düşük gürültülü yükseltici 1090 MHz bandını tutar, geri kalan her şeyi reddeder ve sinyali bin kat yükseltir. Yazılım tanımlı bir radyo frekansa ayarlanır ve sinyali saniyede iki milyon kez örnekleyerek bir sayı akışına dönüştürür. Bir kod çözücü bu akışta önsöz desenini arar, 112 biti okur, eşliği denetler ve alanları çözer. Ve bir izleyici her uçaktan gelen mesajları tek ve sürekli güncellenen bir kayıtta toplar: bir konum, bir rota, bir etiket.

Dikkat çekici aşama üçüncüsüdür. 2010 civarına kadar 1090 MHz'in kodunu çözmek binlerce avroya mal olan özel donanım gerektiriyordu. Sonra hobiciler, 20 avroluk bir USB televizyon alıcısının, herhangi bir frekansa ayarlanıp ham sinyali bir bilgisayara aktarması sağlanabilen bir çip içerdiğini keşfetti. Bu **yazılım tanımlı radyo**, radyo sorununu bir programlama sorununa dönüştürür: bir dizüstü bilgisayar ya da bir Raspberry Pi, sinyal gücünü tanımlayan saniyede iki milyon sayılık bir akış alır ve ücretsiz yazılım önsöz

desenini arar, her mikrosaniyelik aralığın hangi yarısının daha güçlü olduğunu ölçer, 112 biti birleştirir, CRC'yi hesaplar ve alanları yazdırır. Ortaöğretim setindeki alıcı projesi tam olarak bu zincirdir ve bir okul bunu 100 avronun altında kurabilir.

İzleyici aşaması, mesaj akışının bilgiye dönüştüğü yerdir. Hatırlayın, tek bir konum mesajı, bir çift ve bir tek mesaj eşleştirilene kadar belirsizdir. Hız bilgisi konumdan ayrı, çağrı işareti de yine ayrı gelir; izleyici bunları ICAO adresine göre bir araya getirir, hata denetiminden geçemeyen her şeyi atar ve her uçağın bilinen son durumunu tutar. Bir dakika boyunca hiç mesaj gelmezse, ki bu genellikle uçağın ufkun altına inmesinden kaynaklanır, iz sona erer.

BÖLÜM 10

Tek bir alıcıdan bir kıtanın haritasına

Tek bir alıcı, birkaç yüz kilometre genişliğinde bir gökyüzü dairesini duyar. Bir Avrupa haritası bunlardan yüzlercesini gerektirir ve işe yarayanlar şehirlerde değil, dağınık hâlde bulunanlardır: kıyılarda, vadilerde, adalarda, başka bir alıcının dairesinin ulaşmadığı her yerde. Her alıcı, çözdüğü mesajları, her birine varış zamanı damgası vurulmuş olarak, internet üzerinden merkezi bir hizmete gönderir. Bu hizmet verileri *birleştirir*: yüksekteki bir uçaktan gelen aynı mesaj genellikle aynı anda on ya da yirmi alıcıdan ulaşır ve tekrarların tanınıp birleştirilmesi gerekir. Ayrıca denetim yapar: aynı uçağa ilişkin tüm komşu alıcıların görüşüyle çelişen bir konum muhtemelen bir kod çözme hatası ya da arızalı bir transponderdir ve işaretlenir ya da atılır.

Multilaterasyon: nerede olduklarını söylemeyen uçakları bulmak

Her uçak konum yayınlamaz. Eski transponderler radara kimlik ve irtifa ile yanıt verir ama uydu girdisine sahip değildir; bazı uçaklar bilerek hiç konum göndermez. Yine de 1090 MHz yayınları yere ulaşır ve bir ağ, uydu navigasyonunu tersine çevirerek onların yerini belirleyebilir. Saatleri hassas biçimde senkronize edilmiş dört alıcının her biri aynı yayının ulaştığı anı kaydederse, bu anlar arasındaki farklar mesafe farklarını ortaya çıkarır: A alıcısına B alıcısından bir mikrosaniye önce ulaşan bir mesaj, A'ya B'den 300 m daha yakın bir noktadan gönderilmiştir. Bu özelliğe sahip tüm noktalar, A ile B arasında eğri bir yüzey, bir hiperboloit üzerinde bulunur. Dört alıcıdan elde edilen bu tür üç yüzey, uçağın bulunduğu yerde kesişir. Buna **multilaterasyon** denir ve birbirinden yüzlerce kilometre uzaktaki alıcılar arasında mikrosaniyenin onda biri, yani 30 m düzeyinde bir zamanlama gerektirir; alıcılar bu zamanlamayı uçağın kullandığı uydulardan elde eder.

Aynı fikir, iki kez
Uydu navigasyonu: bir alıcı, konumları bilinen dört verici, alıcının yeri çözülür. Multilaterasyon: bir verici, konumları bilinen dört alıcı, vericinin yeri çözülür. Her ikisinde de gerçekte ölçülen şey zamandır ve 1 mikrosaniye 300 metredir.

BÖLÜM 11

Ne için kullanılır ve nerede yetersiz kalır

İlk kullanıcı hava trafik kontrolüdür. Avrupa genelinde kontrolörler artık saniyede iki kez güncellenen ve uydu düzeyinde doğruluk sunan ADS-B'nin radar ve multilaterasyonla birleştirildiği bütünleşik bir tablo görüyor; radarın hiç ulaşmadığı yerlerde, Kuzey Atlantik, Arktik, Sahra ve okyanusların çoğu üzerinde,

ADS-B mesajları alçak yörüngedeki haberleşme uydularında taşınan alıcılar tarafından alınıyor ve bu sayede Atlantik'i geçen uçaklar eskisinden çok daha yakın aralıklarla uçabiliyor. İkinci kullanıcı uçaklardır: "ADS-B In" özellikli bir yolcu uçağı, yakındaki trafiği mürettebatına gösterir ve çarpışma önleme sistemine aktarır. Havalimanları sisli havada yerdeki uçakları ve araçları izlemek için kullanır. Araştırmacılar açık verileri gürültü, yakıt tüketimi, kondensasyon izleri ve gecikmeleri incelemek için kullanır. Ve bir okul çatısındaki alıcı, küçük ölçekte de olsa, tüm bunların bir parçasıdır.

Sistemin zayıflıkları doğrudan tasarımından kaynaklanır ve her birini yalnızca listelemek yerine anlamaya değer. Mesajlar açık olarak, ne şifrelenmeden ne de imzalanmadan yayınlandığı için, bir mesajın kendisinde onun bir uçaktan geldiğini kanıtlayan hiçbir şey yoktur. Yerdeki bir verici, yasa dışı olarak, var olmayan bir uçağı tanımlayan kusursuz biçimlendirilmiş bir mesaj yayınlayabilir ve bir alıcı onu hiç itiraz etmeden çözer. Sistemi koruyan şey mesajın kendisi değil, onu çevreleyen bağlamdır: hayalet bir uçak radarda görünmez, multilaterasyonla bulunamaz ve gerçek trafik gibi davranmaz; kontrol merkezleri de sürekli çapraz denetim yapar. Kriptografik imzalar içeren bir protokol sürümü uzun yıllardır tartışılmaktadır; engel teknik olmaktan çok pratiktir, çünkü dünyadaki her transponderin değişmesi gerekirdi.

Konum uçağın uydu alıcısına bağlı olduğundan, uydu navigasyonunu bozan her şey ADS-B'yi de bozar. Uydu sinyallerinin karıştırılması (jamming) ve sahtelenmesi (spoofing) çatışma bölgelerinin yakınında yaygınlaştı ve böyle bir bölgeden geçen bir uçak konum hesaplayamayabilir ya da yanlış bir konum hesaplayabilir. Bu durumda mesajları düşürülmüş bir bütünlük kategorisi taşır, kontrolörün sistemi onları işaretler ve ADS-B'nin hiçbir zaman tamamen yerini alması amaçlanmayan bağımsız ölçüm, yani radar devreye girer. Dolayısıyla ikisi arasındaki ilişki halef ile selef ilişkisi değil, birbirini tamamlayan zayıflıklara sahip ortakların ilişkisidir.

Zorunluluk yolcu uçaklarını ve büyük hava araçlarının çoğunu kapsadığı, ancak uçan her şeyi kapsamadığı için harita, tasarım gereği eksiktir. Kontrollü hava sahası dışındaki hafif uçaklar, planörler, balonlar ve birçok askeri uçak hiç ADS-B taşımayabilir ve bazı hafif uçaklar 1090 MHz alıcısının duymadığı başka sistemler kullanır. Ve yayın hava aracını tanımladığı için sahibini de tanımlayabilir: belirli bir özel jeti takip etmek, fiilen belirli bir kişiyi takip etmektir; bu durum, sahipleri talep eden uçakların tescilini gizleyen programlara ve bir uçağın dünyaya yayınladığı bilginin aynı zamanda özel olup olamayacağı konusunda süregelen bir tartışmaya yol açmıştır. Bu tartışma, büyük öğrencilere yöneltmek için iyi bir konudur, çünkü fizik buna bir yanıt vermez.

BÖLÜM 12

Kısa bir tarihçe

1935 - 1945

Birincil radar İngiltere, Almanya ve Amerika Birleşik Devletleri'nde geliştirilir; savaşın sonunda "dost ya da düşman tanımlama" (IFF) transponderleri radar darbelerine kodlu bir yanıtla cevap verir, bu da ikincil radarın atasıdır.

1950'ler - 1960'lar

Sivil ikincil radar standartlaştırılır: 1030 MHz sorgulamalar, 1090 MHz yanıtlar, Mode A kimlik kodları ve Mode C irtifası.

1980'ler

Benzersiz 24 bitlik adresler ve veri mesajlarıyla Mode S, MIT Lincoln Laboratuvarı'nda geliştirilir ve ICAO tarafından kabul edilir. GPS sivil kullanıcılar için hizmete girer.

1990'lar - 2000'ler

ADS-B tanımlanır ve özellikle radar kapsamasının imkânsız, kazaların sık olduğu Alaska'da denenir. 1090 MHz extended squitter uluslararası olarak standartlaştırılır.

2010'lar

Ucuz yazılım tanımlı radyolar sinyal almayı bir hobiye dönüştürür; binlerce alıcıdan oluşan gönüllü ağlar ortaya çıkar. Okyanus kapsaması için alıcılar uydulara yerleştirilerek fırlatılır.

2020

ADS-B, Amerika Birleşik Devletleri'nde (ocak) ve Avrupa Birliği'nde (haziran, yıl sonuna kadar geçiş süresiyle) kontrollü hava sahasındaki çoğu hava aracı için zorunlu hâle gelir. Gökyüzü her yerde, her zaman konuşmaya başlar.

Sözlük

ADS-B
Automatic Dependent Surveillance - Broadcast (otomatik bağımlı gözetim - yayın). Hava araçlarının kendi konumlarını yayınlaması.

Barometrik irtifa
Standart atmosfer kullanılarak hava basıncından türetilen yükseklik; uçakların bildirdiği irtifa budur.

CPR
Kompakt konum raporlama: hassas bir konumu 34 bite sığdıran çift/tek yöntemi.

CRC
Döngüsel artıklık denetimi: her mesajın sonundaki 24 bitlik hata denetimi.

Extended squitter (genişletilmiş squitter)
ADS-B'yi taşıyan, 112 bitlik, kendiliğinden gönderilen Mode S yayını.

GNSS
Küresel navigasyon uydu sistemi: GPS, Galileo, GLONASS, BeiDou.

ICAO adresi
Bir uçağın transponderinin kalıcı 24 bitlik kimliği.

Mode S
ADS-B'nin üzerine kurulduğu seçici ikincil radar standardı.

Multilaterasyon
Bir vericinin yerini, sinyalin birkaç alıcıya varış zamanları arasındaki farklardan belirleme.

Yol kaybı
Bir sinyalin ters kare yasasına göre mesafeyle zayıflaması.

Radyo ufku
Anten ile uçak arasındaki düz bir çizginin Dünya'ya çarpmadan geçebildiği en uzak mesafe.

SDR
Yazılım tanımlı radyo: ham sinyal örneklerini kod çözme için bir bilgisayara aktaran alıcı.

SSR
İkincil gözetim radarı: yer sorgular, transponder yanıt verir.

Transponder
Radara yanıt veren ve 1090 MHz üzerinden ADS-B yayınlayan uçak telsizi.

Dalga boyu
Bir dalganın ardışık tepeleri arasındaki mesafe: c / f, 1090 MHz'de 27,5 cm.

SIRADA

Teoriden pratiğe: alıcıyı kurun

On iki bölüm, artık elinizde tutabileceğiniz bir sistemi açıkladı. Uygulamalı atölye bunları bir öğleden sonralık bir işe dönüştürür: 100 ila 150 avroya ne satın alınacağı, antenin nasıl yapılıp yerleştirileceği, bir Raspberry Pi'nin nasıl hazırlanıp Dataero veri sağlayıcı yazılımının nasıl kurulacağı ve duyduğunuz uçakların istasyonunuza atfedilerek canlı haritada belirişinin nasıl izleneceği. Yukarıdaki her bölüm için orada sizi bekleyen bir ölçüm var: gerçek uçaklarla radyo ufku, sinyal sütununda ters kare yasası, gökyüzünün günlük ritmi.

Uygulamalı atölyeyi açın `https://radar.dataero.eu/tr/learning/workshop`