12-18 YAŞ - ÖĞRETMEN İÇİN

# Gökyüzünü çözmek: tek bir gerçek sistem üzerinden fizik ve bilişim

Beş ders ve bir proje. Her ders ADS-B'nin bir bölümünü ele alır ve arkasındaki fiziği ya da bilişimi bütünüyle geliştirir: sınıfın izleyebileceği yerlerde türetmeler, gerçek sayılarla çözümlü örnekler, fikri gözlemlenebilir kılan deneyler ve öğrencilerin sezgisinin yanıldığı noktalar. Yaş aralığının küçük ucu (12-14) fikirleri ve hesapları izler; büyük ucu (15-18) türetmeleri izler ve projeyi yürütür.

Öğren - https://radar.dataero.eu/tr/learning/ages-12-18 2026-11-21

İÇİNDEKİLER

Başlamadan önce: tek bir gerçek sistem neden beş derse değer

1. DERS - FİZİK Dalgalar ve elektromanyetik spektrum: mesaj neyin üzerinde yol alır

2. DERS - FİZİK VE MATEMATİK Zaman ve konum: uçak nerede olduğunu nasıl bilir, bir ağ söylemeyen bir uçağı nasıl bulur

3. DERS - BİLİŞİM Dijital mesaj: 112 bit, nasıl gönderildikleri ve hataların nasıl yakalandığı

4. DERS - FİZİK Yayılım ve menzil: Dünya'nın eğriliği ve ters kare yasası

5. DERS - FİZİK VE MÜHENDİSLİK Antenler ve alıcılar: 27 santimetrelik bir dalgadan haritadaki bir noktaya

PROJE - İKİ İLA DÖRT HAFTA Bir alıcı yapın ve fiziği gökyüzüne karşı sınayın

Öğrencinin görevlerinin yanıtları

SIRADAKİ Proje, adım adım

## Başlamadan önce: tek bir gerçek sistem neden beş derse değer

12 ile 18 yaş arasında öğretilen fiziğin büyük bölümü parça parça öğretilir: bir yerde dalgalar ünitesi, başka bir yerde elektromanyetik spektrum, bilişimde dijital veri konusu, coğrafyada uydulardan kısaca söz edilmesi. ADS-B, bu parçaların hepsinin aynı anda taşıyıcı rol oynadığı tek bir çalışan sistemdir ve sınıf sonucu bir ders kitabından daha ucuza mal olan bir alıcıyla gözlemleyebilir. Bir uçak konumunu uydulardan gelen radyo sinyallerini zamanlayarak belirler: bu, üç boyutlu konum belirleme (trilaterasyon) ve ışık hızıdır. Sonucu döngüsel artıklık denetimi (CRC) içeren 112 bitle kodlar: bu, ikili kodlama ve hata tespitidir. Bitleri 1090 MHz'te darbe konum modülasyonlu bir radyo dalgası olarak iletir: bu, spektrum, frekans ve dalga boyudur. Dalga bir alıcıya yalnızca Dünya'nın eğriliğini aşan düz bir çizgi boyunca ulaşır ve uzaklığın karesiyle ters orantılı olarak zayıflamış gelir: bu, geometri ve enerjidir. Çeyrek dalga boyunda ayarlanmış bir anten onu akıma dönüştürür: bu, rezonanstır. Ve bir alıcılar ağı, susan bir vericinin yerini bile varış zamanı farklarından bulabilir: bu, uydu probleminin tersyüz edilmiş hâlidir. Aşağıdaki her ders bunlardan birini alır ve kendi başına geliştirir; ADS-B bir süs olarak değil, baştan sona izlenen örnek olarak kullanılır.

Ana sayfadaki temel kurs sistemin tamamını anlatı biçiminde sunar; sınıf 3. dersten önce 3. ve 5. bölümlerini, 4. ve 5. derslerden önce 6-8. bölümlerini okumalıdır; sözlüğü de yararlı bir dağıtım materyalidir. Bu sayfa onu okuduğunuzu varsayar ve fiziğe ve öğretime odaklanır. Sayısal kabuller baştan sona tutarlıdır: c = 3,00 x 10^8 m/s, f = 1090 MHz, yükseklikler metre, uzaklıklar kilometre cinsindendir; örnekte aksi belirtilmedikçe seyir hâlindeki uçak 11 000 m (uçuş seviyesi 360) ve 250 m/s olarak alınır.

Sezgiyle ilgili iki uyarı. Öğrenciler radyo dalgalarının bir tür ses olduğuna ve uçakları "radarın" ya da "uyduların" gördüğüne inanarak gelir. İkisi de yanlıştır, ikisi de 1. ve 2. derslerde açıkça ele alınır ve ikisi de yeniden ortaya çıkacaktır; kurs, sonraki her dersin bunları düzeltmeniz için size yeni bir gerekçe vereceği biçimde tasarlanmıştır. Ayrıca formüllerle rahat olan öğrenciler çoğu zaman büyüklüklerle rahat değildir: kurs her adımda "bu ne kadar büyük?" diye sormaya ağırlık verir, çünkü mikrosaniyede 300 m, 145 dB yol kaybı ve 2^24 adres, fiziği gerçek hissettiren türden sayılardır.

**1. DERS - FİZİK**

## Dalgalar ve elektromanyetik spektrum: mesaj neyin üzerinde yol alır

Kursun tamamının dayandığı gözlemle başlayın: bir uçağın radyo mesajı ile bir ışık demeti aynı fiziksel olgudur. İkisi de elektromanyetik dalgadır; salınan elektrik ve manyetik alanlar herhangi bir ortama ihtiyaç duymadan uzayda yayılır, boşlukta her frekans için aynı, havada da neredeyse aynı olan bir c hızıyla: 299 792 458 m/s; sınıf bunu 3,00 x 10^8 m/s olarak alabilir. Radyoyu görünür ışıktan, görünür ışığı da X ışınlarından ayıran tek nicelik salınımın frekansı f'dir. Retinamız yaklaşık 4 x 10^14 ile 8 x 10^14 Hz arasındaki frekanslara tepki verir ve bunları kırmızıdan mora renkler olarak algılarız; ADS-B ise 1,09 x 10^9 Hz'te iletilir, yani yaklaşık yarım milyon kat daha düşük bir frekansta. Dalgada türce farklı hiçbir şey yoktur; yalnızca gözlerimiz seçicidir.

Dalga denklemini sınıfa hazır vermek yerine türetin. Bir dalga c hızıyla ilerliyor ve saniyede f kez salınıyorsa, bir saniyede c kadar yol almış ve f tam çevrim üretmiştir; dolayısıyla her çevrim c / f uzunluğunda yer kaplar. Bu uzunluk dalga boyudur, lambda; böylece c = f x lambda olur. ADS-B'ye uygulandığında: lambda = 3,00 x 10^8 / 1,09 x 10^9 = 0,275 m. Uçak ile alıcı arasındaki mesajın tepeleri birbirinden 27,5 cm uzaktadır. Sınıfa bunu kendi çizdikleri logaritmik eksenli bir spektrumun üzerine yerleştirtin: 100 MHz ve 3 m'de FM yayını, 1 090 MHz ve 27,5 cm'de ADS-B, 1 800 MHz ve 17 cm'de cep telefonları, 2 450 MHz ve 12 cm'de Wi-Fi ve mikrodalga fırınlar, kızılötesi, 5,6 x 10^14 Hz ve 540 nm'de görünür ışık ve X ışınlarına kadar devamı. Uçağın dalgasını bir telefon ile bir fırının arasına yerleştirmek herhangi bir tablodan daha değerlidir, çünkü bunların komşu olduğunu gösterir.

Şimdi ses karışıklığıyla doğrudan yüzleşin, çünkü bu yanılgı evrenseldir ve karşılaştırma her iki olguyu da öğretir. Ses, bir ortamda ilerleyen boyuna bir basınç dalgasıdır; hızı ortamın bir özelliğidir: 20 derecede havada 343 m/s, suda yaklaşık 1 500 m/s, boşlukta sıfır. Radyo ise hiçbir ortama ihtiyaç duymayan enine bir elektromanyetik dalgadır; boşlukta c hızıyla, havada fark edilemeyecek kadar az daha yavaş ilerler. Farka bir sayı koyun: 3,00 x 10^8 bölü 343 yaklaşık 875 000'dir. 30 km uzaktaki bir uçak aynı anda bir ses ve bir mesaj yayarsa mesaj 100 mikrosaniyede, ses 87 saniyede ulaşır; ses vardığında uçak 22 km yol almıştır. Deney olarak sınıfta bir ip ve oyun alanının öbür ucuna tutulan bir el feneri kullanın: ipteki dalganın ipe ihtiyaç duyduğu ve ipin belirlediği bir hızla ilerlediği açıkça görülür, fener ışığı ise öbür uca kimsenin ölçemeyeceği bir gecikmeyle ulaşır. İpin ışıkla neyi paylaştığını (dalga olması, dalga boyu, frekans, sabit bir hız ve dolayısıyla f ile lambda arasındaki ters ilişki) ve neyi paylaşmadığını (bir ortam, saniyede metrelerle ölçülen bir hız) açıkça listeleyin.

Gösterimi ucuz olan ve 5. derste karşılığını veren kutuplanmayla bitirin. Bir elektromanyetik dalganın elektrik alanı, ilerleme yönüne dik, belirli bir doğrultuda salınır. Uçakların transponder antenleri dikeydir, bu nedenle ADS-B dalgası dikey kutupludur; alıcı antenin de dikey olması gerekir, yatay çevrildiğinde neredeyse hiçbir şey duymaz. Dikey sallanan bir ip dalgası karton bir kutudaki dikey yarıktan geçer, yatay bir yarıkta durur; ucuz bir 3D gözlükten çıkarılan iki kutuplayıcı film bir pencereye karşı çapraz tutulduğunda aynı şeyi ışık için gösterir. Sınıftan, alıcı anten yatırıldığında alıma ne olacağını tahmin etmelerini isteyin. Tahminlerini projede sınayacaklar.

**Verilecek çözümlü örnek**
Amerika Birleşik Devletleri'nde hafif uçakların kullandığı ikinci ADS-B sistemi 978 MHz'te yayın yapar. Dalga boyu nedir ve bunun için bir çeyrek dalga anteni ne uzunlukta olurdu? (0,307 m; 7,7 cm.) Bunu yapabilen bir öğrenci 1. dersi kavramıştır.

2. DERS - FİZİK VE MATEMATİK

## Zaman ve konum: uçak nerede olduğunu nasıl bilir, bir ağ söylemeyen bir uçağı nasıl bulur

Uçağın konumu hakkında yayınladığı her şey uydu navigasyonundan gelir ve uydu navigasyonu özünde bir zaman ölçümüdür. Yaklaşık 20 200 km'de yörüngede dolanan her GNSS uydusu bir atom saati taşır ve kendi konumunu ve tam yayın anını bildiren bir sinyal gönderir. Alıcı varış anını kaydeder. Aradaki fark c ile çarpıldığında o uyduya olan uzaklık elde edilir ve böyle tek bir uzaklık alıcıyı, merkezi uydu olan o yarıçaptaki bir kürenin üzerine yerleştirir. Sayıları sınıfa türettirin: iki küre bir çemberde, üç küre iki noktada kesişir; bu noktalardan biri Dünya yüzeyinden çok uzaktadır ve elenebilir. Yani alıcıda kusursuz bir saat olsaydı üç uydu yeterdi. Ama öyle bir saat yoktur; bir kuvars osilatör gereken nanosaniyelerden çok daha fazla kayar. Konunun zarif özü olan çözüm, alıcının saat hatasını dördüncü bir bilinmeyen olarak ele almak ve dördüncü bir uydu kullanmaktır: dört bilinmeyenli (x, y, z ve saat sapması) dört denklem, sürekli olarak çözülür. Bu nedenle bir GNSS alıcısı görüş alanında dört uyduya ihtiyaç duyar ve yan ürün olarak zamanı onlarca nanosaniye hassasiyetle tutar; 5. dersteki ağın alıcılarının saatleri için uçaklarla aynı uyduları kullanmasının nedeni budur.

Büyüklükleri tahtaya yazın ve sürekli onlara dönün. Işık bir nanosaniyede 0,300 m, bir mikrosaniyede 300 m yol alır. 1 mikrosaniyelik bir zaman hatası 300 m'lik bir uzaklık hatasıdır; modern bir alıcının birkaç metrelik doğruluğu on nanosaniye düzeyinde zamanlamaya karşılık gelir. Tam tepedeki bir uydudan gelen yolculuk süresi 20 200 km / 3,00 x 10^5 km/s = 0,0673 s, ufka yakın bir uydudan yaklaşık 0,086 s'dir; yani alıcı birkaç milisaniyelik farkları bunun yüz milyonda biri hassasiyetle ölçmektedir. Sınıfa bir uydunun saati bir mikrosaniye ileri olsaydı ne olacağını sorun; onu kullanan her alıcının o uyduya doğru uzanan çizgi boyunca yaklaşık 300 m itileceğini görmeleri gerekir. Uydu saatlerinin günde birkaç kez yerden düzeltilmesinin nedeni budur.

İki irtifayı birbirinden ayırın, çünkü mesaj ikisini de taşır ve öğrenciler hep sorar. Uydu çözümü, Dünya'nın referans elipsoidinin üzerindeki geometrik yüksekliği verir. Buna karşın uçaklar barometrik irtifa bildirir: gövde dışındaki statik basınç, deniz seviyesinde 1013,25 hPa ve 15 derece ile kilometrede 6,5 derecelik düşüş varsayan Uluslararası Standart Atmosfer (ISA) üzerinden yüksekliğe çevrilir. Gerçek basıncın standarttan farklı olduğu bir günde her uçağın barometrik irtifası aynı miktarda yanlıştır; ayırma için tam da gereken budur: uçuş seviyesi 350 ve 360 okuyan iki uçak, hava nasıl olursa olsun 1 000 ft aralıklıdır.

ADS-B konum mesajları barometrik irtifayı 25 fitlik adımlarla taşır; hız mesajı barometrik ile geometrik yükseklik arasındaki farkı taşır, böylece bir alıcı ikisini de elde edebilir. Büyük yaş grubu için ISA bağıntısı p = p0 (1 - 0,0065 h / 288,15)^5,255 iyi bir hesap tablosu alıştırmasıdır: p'den h'yi bulmak için ters çevirin ve 11 000 m'nin yaklaşık 227 hPa'ya, yani deniz seviyesi basıncının beşte birine karşılık geldiğini doğrulayın.

Şimdi problemi tersyüz edin. Bazı uçaklar 1090 MHz'te uydu konumu olmadan yayın yapar: radara yalnızca kimlik ve irtifayla yanıt veren eski transponderler ya da GNSS'si karıştırılan uçaklar. Bir alıcılar ağı yine de yerlerini bulabilir. Saatleri senkronize dört alıcının aynı yayının varış zamanını kaydettiğini varsayın. Verici bilinmiyor, alıcılar biliniyor: bu, bilinen ile bilinmeyenin rollerinin yer değiştirdiği GNSS problemidir. A alıcısına B alıcısından bir mikrosaniye önce varan bir mesaj, A'ya B'den 300 m daha yakın bir noktadan gönderilmiştir ve bu tür noktaların geometrik yeri, odakları A ve B olan bir hiperboloittir. Dört alıcıdan alınan üç bağımsız çift üç hiperboloit verir; bunların kesişimi uçaktır. Bu, çoklu konum belirlemedir (MLAT) ve alıcıların saatlerinin yaklaşık 100 ns içinde uyuşmasını gerektirir; bunu da uydulardan sağlarlar. Sınıf için oyun alanı alıştırmasıyla iki boyuta indirgeyin: ölçülmüş noktalarda kronometreli üç öğrenci durur, bir yerde saklanan dördüncüsü el çırpar, üçü tepki süresine göre düzeltilmiş gecikmelerini kaydeder ve sınıf 343 m/s kullanarak hiperbolleri çizer (ya da daha basitçe ölçekli bir çizim üzerinde deneme konumları kullanır) ve el çırpanı bulur. Ardından aynı şeyi 200 km üzerinden radyoyla yapmak için zamanlama hassasiyetinin ne olması gerektiğini sorun ve bir kronometre ile bir atom saati arasındaki uçurumu hissetmelerini sağlayın.

**Verilecek çözümlü örnek**
Aralarında 60 km bulunan iki alıcı bir mesajı 50 mikrosaniye arayla kaydediyor. Uçak birinci alıcıya ne kadar daha yakındı? (15 km.) Saatler birbirine göre 1 mikrosaniye hatalı olsaydı bu, yanıtta ne kadarlık bir hataya yol açardı? (300 m.) İkinci yanıtın neden uzaklığa bağlı olmadığını açıklayabilen bir öğrenci, çoklu konum belirlemenin ne gerektirdiğini anlamıştır.

3. DERS - BİLİŞİM

## Dijital mesaj: 112 bit, nasıl gönderildikleri ve hataların nasıl yakalandığı

Uçağın transponderi ADS-B verisini bir Mode S genişletilmiş squitter'ı olarak gönderir: 8 mikrosaniyelik bir giriş dizisi (preamble) ve ardından tam olarak mikrosaniyede bir bit hızında 112 veri biti. Derse giriş dizisiyle başlayın, çünkü öğrencilerin henüz sormayı düşünmediği bir soruyu yanıtlar: kanal gürültüyle ve başka uçaklarla doluyken bir alıcı bir mesajın başladığını nasıl bilir? Giriş dizisi, 0, 1, 3,5 ve 4,5 mikrosaniyelerde dört darbeden oluşan sabit bir desendir. Kod çözücü sürekli bu deseni arar; bulduğunda hem bir mesajın geldiğini hem de her bit aralığının tam olarak ne zaman başladığını bilir. Öğrencilerin karşılaştığı her dijital protokolün, Wi-Fi'dan QR koduna kadar, bir karşılığı vardır ve bunu söylemek için iyi bir andır.

Ardından modülasyon. Bir radyo açık ya da kapalı olabilir; 1'i ya da 0'ı nasıl gönderirsiniz? ADS-B darbe konum modülasyonu (PPM) kullanır: her bir mikrosaniyelik bit aralığı iki yarıya bölünür; ilk yarıda bir darbe ve ardından sessizlik 1, sessizlik ve ardından bir darbe 0 anlamına gelir. Tahtaya birkaç biti darbe olarak çizin ve sınıfa okutun. Sonra bunun neden "darbe 1, darbe yok 0" şeklindeki bariz yöntemden daha iyi olduğunu sorun. Biraz yönlendirmeyle iki neden ortaya çıkar. Her bitte her zaman tam olarak bir darbe

vardır, böylece alıcı sıfırlardan oluşan bir dizide bile zamanlamasını kilitli tutabilir; ayrıca her biti, bir darbenin mutlak bir eşiği aşıp aşmadığına bakarak değil, hangi yarının daha güçlü olduğuna bakarak belirleyebilir; bu da kod çözmeyi sinyalin o an ne kadar güçlü olduğuna duyarsız kılar. Basit yöntemde uzun bir sıfır dizisi sessizlikten ayırt edilemezdi; PPM'de ise ikinci yarı darbelerinden oluşan düzenli bir davul vuruşudur.

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




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

Şimdi 112 bitin düzeni; sınıf dersin sonunda bunu ezbere yeniden üretebilmelidir. 1-5. bitler aşağı bağlantı biçimidir (downlink format); bir transponderden gelen ADS-B için 17'dir. 6-8. bitler bir yetenek kodudur. 9-32. bitler 24 bitlik ICAO adresidir, uçağın kalıcı kimliği. 33-88. bitler 56 bitlik mesaj alanıdır; ilk beş biti olan tür kodu, kalan 51 bitin ne içerdiğini söyler: bir kimlik mesajı (tür kodları 1-4) sekiz karakterlik çağrı işaretini sekiz adet 6 bitlik karakter olarak taşır; bir havadaki konum mesajı (9-18) 12 bit barometrik irtifa, bunun çift mi tek mi çerçeve olduğunu söyleyen bir bayrak ve kodlanmış enlem ile boylam için 17'şer bit taşır; bir hız mesajı (19) yer hızının doğu-batı ve kuzey-güney bileşenlerini, dikey hızı ve barometrik-geometrik yükseklik farkını taşır. 89-112. bitler 24 bitlik eşlik (parity) alanıdır. Hesabı verin: 24 bitlik adres 2^24 = 16 777 216 uçak sağlar; sekiz adet 6 bitlik karakter her biri için 64 sembole izin verir, harfler, rakamlar ve boşluk için yeterlidir; 25 fitlik adımlarla 12 bit irtifa 102 400 fiti kapsar; 17 bitlik enlem ise 180 derece üzerinde basitçe kullanılsaydı yalnızca 1,4 km çözünürlük verirdi, bu da kompakt konum raporlamanın (CPR) yanıtladığı soruyu doğurur. CPR'yi bir paragrafta açıklayın: 17 bit, konumu bir bölge içinde birkaç metre hassasiyetle verir ama hangi bölge olduğunu vermez; uçak iki bölge ızgarası, çift ve tek, arasında gidip gelir ve her birinden birer tane alan bir alıcı bölgeyi kesin olarak belirleyip sonra tek mesajlarla izlemeyi sürdürebilir. Aynı bitlerden zamanı kullanarak daha fazla hassasiyet elde etmenin güzel bir örneğidir.

| **DF**<br>5 bit<br>aşağı bağlantı biçimi | **CA**<br>3 bit<br>yetenek | **ICAO adresi**<br>24 bit<br>benzersiz uçak kimliği | **ME - yük**<br>56 bit<br>ilk 5 bitindeki tür koduna göre konum, irtifa, hız, çağrı işareti ya da durum | **PI**<br>24 bit<br>hata denetimi (CRC) |
|---|---|---|---|---|

Sınıfa gerçek bir mesaj verin ve onu parçalarına ayırmalarını sağlayın. Onaltılık 8D4840D6202CC371C32CE0576098 dizisi 28 onaltılık basamaktır, yani 112 bit. İlk iki basamak olan 8D ikili tabana çevrildiğinde 10001 101 verir: DF = 17, CA = 5. Sonraki altı basamak, 4840D6, ICAO adresidir ve tahsis tabloları bunu Hollanda'ya atar. Ardından gelen basamaklar, 20 ..., 00100 ile, yani tür kodu 4 ile, bir kimlik mesajıyla başlar ve izleyen 6 bitlik karakterler çözüldüğünde KLM1023 çağrı işareti elde edilir. Son altı basamak, 576098, eşlik alanıdır. Hesap tablosu ya da birkaç satır Python kullanan bir sınıf, kod çözme işleminin tamamını bir derste yapabilir; hedeflenecek kazanım, bir onaltılık diziyi alıp "bu, uçuş numarasını bildiren bir KLM uçağı" diyebilmektir.

> 8D **4840D6** 202CC371C32CE0 576098
>
> 8D: aşağı bağlantı biçimi 17, yetenek 5. 4840D6: ICAO adresi, Hollanda'ya tahsis edilmiş. 20...: tür kodu 4, kimlik, çağrı işareti KLM1023. 576098: 24 bitlik eşlik alanı.

Eşlik alanıyla bitirin, çünkü geliştirilmeye en değer bilişim fikri budur. Yoğun bir havalimanının üzerinde farklı uçaklardan gelen mesajlar bir alıcıda sürekli üst üste biner, darbeler de gürültü nedeniyle kaybolur; bir kod çözücü kaçınılmaz olarak yanlış bitler bir araya getirecektir. Sondaki 24 bitlik alan bir döngüsel artıklık denetimidir (CRC): 88 mesaj biti uzun bir ikili sayı olarak ele alınır ve çıkarmanın dışlayıcı veya (XOR) olduğu özel bir aritmetikte sabit, 25 bitlik bir üreteçle bölünür; kalan, CRC'dir. Alıcı çözdüğü bitler üzerinde bölmeyi tekrarlar ve karşılaştırır. Bozulan tek bir bit, iki bit ve 24 bit uzunluğa kadar her hata patlaması kalanı değiştirir, böylece bozuk mesaj reddedilir. Fikri küçük ölçekte, 8 bitlik bir mesaj üzerinde elle yapılan 4 bitlik bir CRC ile ya da daha basit bir benzeri olan barkoddaki kontrol basamağıyla gösterin; ardından büyük yaş grubuna gerçek CRC-24'ü birkaç satır kodla uygulatın ve örnek mesajın eşlik alanının doğru çıktığını, tek bir bitin değiştirilmesinin ise denetimi başarısız kıldığını doğrulatın. Bu, her modern sistemin yaptığı biçimiyle hata tespitidir ve burada, kaçırılan bir hatanın bir kontrolörün ekranına hayalet bir uçak koyabileceği bir bağlamda karşımıza çıkar.

**Verilecek çözümlü örnek**
Tam bir yayın ne kadar sürer ve bir transponder saniyede 4,5 genişletilmiş squitter gönderiyorsa, zamanın ne kadarında ADS-B yayını yapmaktadır? (120 mikrosaniye; saniyede 540 mikrosaniye, yüzde 0.054.) Kanalda yayınlanan diğer her şey göz ardı edilirse, kanal sürekli meşgul olmadan önce ilke olarak kaç uçak onu paylaşabilirdi? (Yaklaşık 1 850; en yoğun hava sahası üzerindeki tıkanıklığın gerçek bir mühendislik sorunu olmasının nedeni budur.)

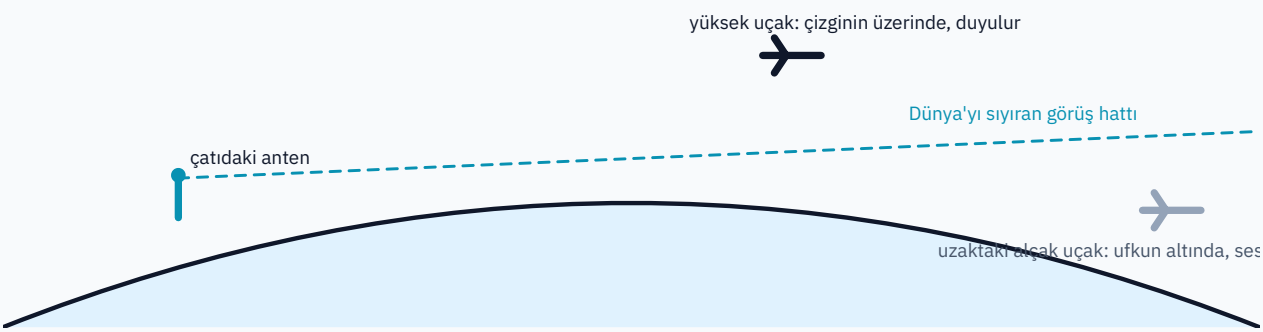
4. DERS - FİZİK

## Yayılım ve menzil: Dünya'nın eğriliği ve ters kare yasası

Bir alıcı bir uçağı ne kadar uzaktan duyabilir? Sorunun birbirinden bağımsız iki yanıtı vardır, geometrik ve enerjetik; dersin amacı ikisini de türetmek ve tasarımcıların bunları örtüşecek şekilde düzenlediğini keşfetmektir. Önce geometri. 1090 MHz'te radyo, Dünya'nın çevresinden işe yarar biçimde kırınıma uğramaz; ışık gibi davranır ve düz çizgiler boyunca ilerler. Bu nedenle bir alıcı yalnızca ufkunun üzerindeki uçakları, yani antene çizilen düz bir çizginin yerden geçmediği uçakları duyabilir. Ufuk uzaklığını sınıfla türetin. Yarıçapı R olan bir kürenin h yüksekliğindeki bir anten, görüş çizgisinin küreye teğet olduğu yerde bir ufuk görür. Teğet, teğet noktasına çizilen yarıçap ve antene çizilen yarıçap, teğet noktasında bir dik açı oluşturur; böylece Pisagor'dan d^2 + R^2 = (R + h)^2, yani d^2 = 2Rh + h^2 elde edilir. h, R'nin yanında çok küçük olduğundan d = sqrt(2Rh). R = 6 371 km ve h metre cinsinden alınırsa, kilometre cinsinden d = sqrt(2 x 6371 x h / 1000) = 3,57 sqrt(h). Atmosferin yoğunluğu ve dolayısıyla kırılma indisi yükseklikle azalır, bu da radyo ışınlarını hafifçe aşağı büker; standart düzeltme Dünya'yı gerçek yarıçapının üçte dört katı yarıçapa sahipmiş gibi ele alır ve 3,57'yi 4,12 ile değiştirir. h1 yüksekliğindeki bir antenden h2 yüksekliğindeki bir uçağa kadar olan tam görüş hattı, iki ufuk uzaklığının toplamıdır:

```
d (km) = 4,12 x ( sqrt(h1) + sqrt(h2) )   h1, h2 metre cinsinden
```

20 m'lik bir çatıdaki anten, 11 000 m'deki uçak: 4,12 x (4,47 + 104,9) = 451 km. Aynı anten, 1 000 m'deki uçak: 4,12 x (4,47 + 31,6) = 149 km. 30 km uzaktaki pistte bulunan uçak: 4,12 x (4,47 + 2) = 27 km, yani duyulmaz.




Sınıfa kendi okullarının anten yüksekliği için d'yi h2'ye karşı çizdirin; önce dik çıkıp sonra yatıklaşan eğri, her alıcının kapsama biçimini açıklar: seyir trafiği için 400 km ve üzeri bir daire, yaklaşmadaki uçaklar için birkaç on kilometre ve hemen yandaki havalimanı dışında yerdeki hiçbir şey. Ayrıca yüksekliğin bir alıcının diğer tüm özelliklerinden neden daha önemli olduğunu ve sizinle havalimanı arasındaki bir tepenin ya da uçağın uzaklaşırken yatırdığı kendi kanadının bir izi neden anında kestiğini de açıklar. İlkokul kursundaki oyun alanı deneyi, çömelmiş hâlde değil bir bankın üzerinden daha uzağı görmek, ardından türetmeyi yaparsanız bu yaş grubu için küçümsenecek bir şey değildir; önemli olan artık nedenini bilmeleridir.

Şimdi enerji. Bir transponder, tüm yatay yönlerde kabaca eşit olarak birkaç yüz vatlık bir tepe güç yayar. d uzaklığında bu güç 4 pi d^2 alanlı bir küreye yayılmıştır; dolayısıyla sabit etkin alanlı bir antenin yakaladığı güç 1 / d^2 ile azalır: ters kare yasası; sınıf bunu ezberlemek yerine kürenin alanından türetmelidir. İki kat uzaklık, gücün dörtte biri; on kat uzaklık, yüzde biri. Radyo mühendisleri izotropik bir verici ile izotropik bir alıcı arasındaki kaybı desibel cinsinden ifade eder ve büyük yaş grubunun olduğu gibi kabul edebileceği ya da bir antenin etkin alanından, lambda^2 / 4 pi, türetebileceği standart formül şudur:

```
yol kaybı (dB) = 20 log10( d, km ) + 20 log10( f, MHz ) + 32,44
```

400 km ve 1090 MHz'te: 20 x 2,60 + 20 x 3,04 + 32,44 = 52,0 + 60,7 + 32,4 = 145 dB. 250 W'lık bir verici +54 dBm'dir; alınan güç 54 - 145 = -91 dBm, yaklaşık 8 x 10^-13 W, yani bir vatın milyonda birinin milyonda biridir.

Sınıf desibelle daha önce karşılaşmadıysa ona birkaç dakika ayırın, çünkü desibel on dört büyüklük mertebesine yayılan bir çarpmayı toplamaya dönüştürür ve sayının kendisi de öğreticidir: çatıdaki bir alıcı, uçaktan çıkandan 10^14,5 kat daha zayıf bir sinyali algılamaktadır. İyi bir amatör alıcı yaklaşık -100 dBm'ye kadar kod çözebilir, yani 400 km'de yaklaşık 9 dB pay vardır; başka bir deyişle seyir hâlindeki bir yolcu uçağı için enerjetik sınır ile geometrik ufuk aynı yere düşer. Bu bir tesadüf değildir; transponder gücü ve alıcı standartları, bir uçağın ufka kadar duyulabilmesi ve çok daha ötesinde duyulmaması için belirlenmiştir; bu da kanalın komşu ülkeden gelen yayınlarla dolup taşmasını önler.

Büyük yaş grubu için iki ayrıntı. Birincisi Doppler: 250 m/s ile yaklaşan bir uçak alınan frekansı f x v / c = 1,09 x 10^9 x 250 / 3 x 10^8 = 908 Hz kaydırır; bu taşıyıcının milyonda birinden azdır ve alıcı bunu asla fark etmez. Bunu, v / c'nin 250 / 343 olduğu ve uçak geçerken perdenin neredeyse bir oktav değiştiği uçak sesinin duyulabilir Doppler kaymasıyla karşılaştırın. İkincisi sinyalin uçuş süresi: c hızıyla 400 km 1,33 ms sürer, yani mesajdaki konum zaten 1,33 ms eskidir ve bu sürede uçak 33 cm yol almıştır; harita için önemsiz, ama tam da bu mikrosaniyelerle yaşayan 2. dersin çoklu konum belirlemesi için belirleyici.

**Verilecek çözümlü örnek**
10 m'lik bir direkteki alıcı 11 000 m'de seyreden bir uçağı duyuyor, ama 130 km uzaklıkta 600 m'deki hafif bir uçağı duymuyor. Hafif uçak ufkun altında mı? (Ufuk: 4,12 x (3,16 + 24,5) = 114 km, yani evet.) Onu duymak için alıcının ne kadar yüksekte olması gerekirdi? (4,12 x (sqrt(h1) + 24,5) = 130 olmalı, yani sqrt(h1) = 7,05, h1 = 50 m.)

5. DERS - FİZİK VE MÜHENDİSLİK

## Antenler ve alıcılar: 27 santimetrelik bir dalgadan haritadaki bir noktaya

Anten, içinden geçen bir elektromanyetik dalganın alternatif akım indüklediği bir iletkendir; alıcı anten ile verici anten ters yönde çalıştırılan aynı aygıttır ve sınıfa bu karşılıklılık açıkça söylenmelidir. İndüklenen akım, iletken rezonansa girdiğinde en büyüktür: yani uzunluğu, üzerindeki akım dağılımı dalganın salınımına uyacak şekilde olduğunda; tıpkı doğru uzunluktaki bir telin belirli bir notayla ya da bir salıncağın belirli bir itme ritmiyle rezonansa girmesi gibi. Düz bir iletkenin temel rezonansı yarım dalga boyundadır, 1090 MHz'te 13,75 cm; akım ortada en büyük, uçlarda sıfırdır. Hem uçakta hem de çoğu alıcıda kullanılan pratik ADS-B anteni çeyrek dalga monopoldür: iletken bir toprak düzlemi üzerinde duran 6,9 cm'lik dikey bir eleman; toprak düzlemi onu elektriksel olarak yansıtır, böylece eleman ve yansıması birlikte yarım dalga dipolünü oluşturur. Uçakta toprak düzlemi gövdedir; satın alınan bir 1090 MHz anteni aynı geometriyi tüpünün içinde saklar ve duyarlılığını ufka doğru yoğunlaştırmak için birkaç kez üst üste dizer. Sınıfta bir teneke kapak üzerine 6,9 cm'lik bir çubukla yapılan model, geometriyi ve uzunluğu 27,5 cm'lik dalgayla bir cetvelle karşılaştırarak gösterir; ancak projenin alıcısı fabrikada ayarlanmış anteni kullanır, çünkü birkaç milimetrelik hata ev yapımı bir antenin ayarını bozar ve gökyüzünün yalnızca bir kısmını duyar.

Işıma desenini geliştirin, çünkü sınıfın gözlemleyebileceği bir şeyi öngörür. Dikey bir monopol en güçlü şekilde ufka doğru yayar ve alır, kendi ekseni boyunca ise hiç yaymaz; duyarlılığı üç boyutta çizildiğinde, anten deliğinden geçen simit biçimli bir halkadır. Bu nedenle bir alıcı tipik olarak 300 km uzaktaki uçakları kusursuz duyar, tam tepesinden geçen bir uçağı ise birkaç saniyeliğine kaybeder; sınıf bunun kendi alıcılarında olduğunu izleyebilir. Birkaç rezonans elemanın üst üste dizildiği kolineer bir anten simidi daha da yassılaştırır ve uzak uçakların bulunduğu ufukta duyarlılığı, tepedeki boşluk pahasına artırır: bu, dBi ile ifade edilen anten kazancıdır ve duyarlılığı yaratmaktan değil, her zaman onu yeniden dağıtmaktan gelir. 1. dersteki kutuplanmanın artık projenin sınayacağı pratik bir sonucu vardır: anten dikey olmalıdır.

Anten ile bilgisayar arasında her biri küçük bir ders olan üç aşama vardır. Bir bant geçiren filtre 1090 MHz'i geçirir ve birkaç yüz megahertz ötedeki, aksi takdirde yükselteci doyuma ulaştıracak çok daha güçlü cep telefonu yayınlarını reddeder. Alıcıya değil antene yerleştirilen düşük gürültülü bir yükselteç

(LNA), sinyal kabloya girmeden önce onu bin kat çoğaltır; sıra önemlidir, çünkü 1090 MHz'te bir koaksiyel kablo her on metrede sinyalin kabaca yarısını, 3 dB, kaybeder ve kayıptan sonra yükseltmek kablonun gürültüsünü de sinyalle birlikte yükseltirdi. Ardından yazılım tanımlı radyo (SDR): aslen televizyon alıcısı olarak üretilmiş, 20 avroluk bir USB aygıtı; sinyali temel banda indirir ve saniyede iki milyon kez örnekleyerek bir sayı akışına dönüştürür. Bu noktadan sonra radyo problemi bir programlama problemidir. Ücretsiz yazılım örnek akışında giriş dizisi desenini arar, her mikrosaniyelik aralığın hangi yarısının daha fazla enerji taşıdığını ölçer, 112 biti bir araya getirir, CRC'yi hesaplar ve denetimden geçerse alanları çözer. Ardından bir izleyici çift ve tek konum çerçevelerini eşleştirir, konumu, hızı ve kimliği ICAO adresine göre birleştirir ve mesajlar gelmeyi bırakana kadar her uçağın durumunu tutar.

Zinciri sınıfa, her aşamadaki nicelikle birlikte kendi çizecekleri bir diyagram olarak verin: antende nanovoltlarca alternatif akım; yükselteçten sonra mikrovoltlar; SDR'den saniyede iki milyon 8 bitlik sayı; kod çözücüden belki saniyede birkaç yüz tane 112 bitlik çerçeve; izleyiciden uçak başına bir kayıt. Varılacak sonuç şudur: haritadaki bir nokta, her halkası artık anladıkları bir fikir olan bir zincirin öbür ucudur: rezonans, filtreleme, yükseltme, örnekleme, desen eşleştirme, kod çözme, hata denetimi, birleştirme.

**Verilecek çözümlü örnek**
Bir kablo 1090 MHz'te 10 m başına 3 dB kaybediyor. 20 m'lik bir hat bu durumda sinyalin ne kadarını kaybeder? (6 dB, dörtte üçü.) Alıcının sınırı -100 dBm ise ve 400 km'deki bir uçaktan antende alınan sinyal -91 dBm ise, sinyal yükselteç olmadan kabloyu aşabilir mi? (Ancak kıl payı: -97 dBm. Konektörlerdeki yağmur ya da daha uzun bir hat gibi herhangi bir ek kayıp olursa ufuktaki uçak kaybolur. Yükseltecin antene konmasının nedeni budur.)

PROJE - İKİ İLA DÖRT HAFTA

## Bir alıcı yapın ve fiziği gökyüzüne karşı sınayın

Proje beş dersi ölçümlere dönüştürür. Ekipman şunlardır: bir USB yazılım tanımlı radyo donanım kilidi (yaklaşık 25 avro), fabrikada ayarlanmış bir 1090 MHz anteni (50-70 avro), birkaç metre koaksiyel kablo ve ücretsiz kod çözücülerden birini çalıştıran bir dizüstü bilgisayar ya da Raspberry Pi (dump1090 ve ondan türeyenler standarttır). Kurulum bir öğleden sonra sürer ve yazılım birkaç dakika içinde uçakların ICAO adresleri, çağrı işaretleri, konumları, irtifaları ve hızlarıyla bir tablosunu ve bir harita gösterir. Projedeki her şey yalnızca alım yapar; hiçbir şey yayın yapmaz ve sınıf, havacılık frekanslarında yayın yapmanın hem yasa dışı hem de tehlikeli olacağını anlamalıdır. Çatıya çıkmak için okulun olağan onayı gerekir; üst kattaki, ana trafik akışlarına bakan bir pencere son derece iyi bir başlangıçtır. Bu sitedeki Veri sağlayıcı olun sayfası aynı kurulumu adım adım anlatır ve okulun alıcısının canlı haritaya veri göndermesini sağlar.

İlk araştırma radyo ufkudur. Kod çözücü her uçak için en son duyulduğu uzaklığı ve irtifayı bildirir. Bir gün boyunca birkaç irtifa bandındaki uçakların alındığı en büyük menzili toplayın ve menzili irtifaya karşı çizin. Öğrencilerin elinde 4. dersin formülü ve anten yüksekliği vardır; verileri görmeden önce eğriyi tahmin etmeli, sonra karşılaştırmalıdırlar. Uyum genellikle yüksek uçaklar için iyi, alçak uçaklar için daha kötüdür; nedenine dair tartışma (binalar, arazi, antenin tepedeki boşluğu, uçağın kendi gölgelemesi) bir ders kitabının sunamayacağı türden bir kuram-ölçüm yüzleşmesidir. Yazılımın çizdiği, her yönde duyulan en uzak uçakların haritası, tüm bölgenin arazisini kapsamadaki gölgeler olarak gösterir.

İkincisi antendir. Mesaj hızlarını ve en büyük menzili antenin iç mekânda, bir pencerede ve çatıda olduğu; dikey ve yatırılmış olduğu; metal bir yüzey üzerinde durduğu ve her türlü metalden uzak tutulduğu durumlarda karşılaştırın. Her karşılaştırma 1. ve 5. derslerden belirli bir iddiayı sınar ve her sonuç önceden tahmin edilmelidir. En çarpıcı olanı kutuplanma testidir: yatırıldığında anten uçaklarının çoğunu kaybeder.

Üçüncüsü veridir. Trafiğin tam bir gününü kaydedin ve ona sorular sorun: en yoğun saat, seyir irtifalarının dağılımı (öğrenciler bir yayılma bekler ve yolcu uçaklarının çoğunu 10 000 ile 12 000 m arasında bulur), en yakın havalimanından kalkışların tırmanma hızı, uçakları en sık geçen devletler (ICAO adresi tahsisinden). Büyük yaş grubu, yazılımın kaydettiği onaltılık veriden ham mesajları kendileri çözebilir ve CRC'yi kendi kodlarında doğrulayabilir. 30 km ya da daha uzaktaki bir ortak okulda ikinci bir alıcısı olan ve her ikisi de GNSS zaman damgalı çıktı veren bir sınıf, her ikisinin de duyabildiği bir uçağın iki boyutlu çoklu konum belirlemesini deneyebilir ve sonucu uçağın yayınladığı konumla karşılaştırabilir: kursun en iddialı ve gerçek bir kazanımı.

Sistemin ortaya attığı ama yanıtlamadığı sorularla bitirin. Mesajlar imzasızdır, dolayısıyla bir verici hayalet bir uçak yayınlayabilir; sistemi ne korur ve imzalı bir sürümün maliyeti ne olurdu? Uçak, karıştırılabilen uydulara bağımlıdır; karıştırıldıklarında bir kontrolörün ekranındaki tabloya ne olur? Veriler uçakları tanımlar ve bir uçak bir kişiyi tanımlayabilir; kim kimi izleyebilmeli? Alıcıyı kurmuş bir sınıf bu soruları hak etmiştir ve bunlar iyi bir son kompozisyon ya da münazara konusu olur.

## Öğrencinin görevlerinin yanıtları

Öğrenci sayfası, her derse bir ya da iki tane olmak üzere sekiz görev verir; bunlar ödev olarak ya da kurs sonu sınavı olarak kullanılabilir. Tam puan alacak bir yanıtın içermesi gereken akıl yürütmeyle birlikte yanıtlar:

1. 1090 MHz'te dalga boyu: lambda = c / f = 3,00 x 10^8 / 1,09 x 10^9 = 0,275 m. Çeyrek dalga elemanı: 6,9 cm. Akıl yürütme: c = f x lambda; ışık hızının sabit olması ters bir ilişkiyi zorunlu kılar.
2. Işık sesten 3,00 x 10^8 / 343, yani yaklaşık 875 000 kat daha hızlıdır. 30 km'de mesaj 100 mikrosaniye, ses 87 s sürer; 250 m/s hızla giden uçak bu sürede 22 km yol alır.
3. 2 mikrosaniyelik bir saat hatası 2 x 10^-6 x 3 x 10^8 = 600 m'lik bir uzaklık hatası verir. Dört uydu gerekir, çünkü alıcının saat sapması x, y ve z'nin yanında dördüncü bir bilinmeyendir.
4. 2^24 = 16 777 216 adres. Mikrosaniyede 1 bit hızındaki 112 bitlik bir mesaj 112 mikrosaniye, giriş dizisiyle birlikte 120 mikrosaniye sürer.
5. 8D4840D6... içinde 8D, 10001101'dir: ilk beş bit 10001, 17'dir; yani DF = 17, bir Mode S transponderinden gelen ADS-B mesajı; sonraki üç bit, 101, CA = 5 verir. 4840D6 ICAO adresidir.
6. 15 m'lik bir antenden 9 000 m'deki bir uçağa radyo ufku: 4,12 x (3,87 + 94,9) = 407 km. 300 m'deki bir uçak için: 4,12 x (3,87 + 17,3) = 87 km.
7. Uzaklığı iki katına çıkarmak alınan gücü dörtte birine indirir, çünkü aynı yayın gücü dört kat alanlı bir küreye yayılır. 200 km ve 1090 MHz'te yol kaybı: 20 x 2,30 + 60,7 + 32,4 = 139 dB; 400 km'dekinden 6 dB az, dört katlık bir faktörle tutarlı.

8. Yatırılmış bir anten, dikey kutuplu dalgaya göre çapraz kutupludur ve çok az şey alır; indüklenen akım, elektrik alanının iletken boyunca olan bileşenine bağlıdır. Zemin kattaki bir alıcı menzil kaybeder, çünkü ufuk uzaklığı, 4,12 x sqrt(h1), küçülür ve binalar görüş hattını keser.

SIRADAKİ

## Proje, adım adım

6. dersin projesi bir alıcıyı hazır varsayıyordu; uygulamalı atölye onu kurar. Daha önce hiç Raspberry Pi kullanmamış biri için yazılmıştır: fiyatlarıyla alışveriş listesi, seçilecek anten, yerleşimi ve kablo kaybı, Pi'nin hazırlanması, Dataero veri sağlayıcı yazılımını kuran üç komut, istasyonun sahiplenilmesi, kazancın ayarlanması ve fiziği gökyüzüne karşı sınayan, her derse bir tane olmak üzere beş ölçüm. Dataero'ya veri gönderen bir istasyon, sınıfa üzerinde çalışabileceği bir kontrol paneli, bir kapsama haritası ve bir yıllık geçmiş sağlar.

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