물리와 컴퓨팅 - 12~18세

하늘을 해독하기

아래의 16진수 한 줄은 실제 항공기가 1초에 약 두 번씩 보내는 진짜 메시지예요. 이 메시지는 100만 분의 112초 동안 항공기가 누구인지 알리고, 짝을 이루는 다른 메시지들로는 어디에 있는지, 얼마나 높이, 얼마나 빠르게 날고 있는지를 알려요. 이 과정에서는 이 메시지를 이해하는 데 필요한 모든 것을 차근차근 살펴봐요. 메시지를 실어 나르는 파동의 물리, 항공기에 위치를 알려 주는 시간 측정, 메시지를 112비트에 담는 부호화, 메시지가 얼마나 멀리까지 들리는지를 정하는 기하학, 그리고 직접 들어 보기 위해 여러분이 만들 수 있는 수신기까지요.

배우기 - https://radar.dataero.eu/ko/learning/ages-12-18/student 2026-11-21

목차

ADS-B를 한 페이지로 정리하면
1과 파동: 눈에 보이지 않는 빛, 전파
2과 시간과 위치: 항공기는 자기 위치를 어떻게 알까
3과 메시지: 112비트, 그리고 오류를 잡아내는 방법
4과 수신 거리: 지구의 곡면과 역제곱 법칙
5과 안테나와 수신기: 27센티미터 파동에서 지도 위의 점까지
도전 문제
다음 단계 직접 만들어 보기

ADS-B를 한 페이지로 정리하면

> 8D **4840D6** 202CC371C32CE0 576098
>
> 수신기가 기록한 확장 스퀴터 하나예요. 16진수 28자리, 112비트죠. 3과가 끝나면 여러분은 이 메시지의 모든 필드를 읽을 수 있게 될 거예요.

항공 교통 관제는 항공기들이 서로 너무 가까워지지 않도록 모든 항공기의 위치를 끊임없이 알고 있어야 해요. 순항 중인 여객기는 1초에 250 m를 날아가고, 레이더 관제를 받는 항공기 사이에는 수직으로 300 m, 수평으로 9 km의 간격을 두어야 한다는 규칙이 있어요. 70년 동안 위치를 아는 방법은 레이더였어요. 지상국이 펄스를 보내고 메아리가 돌아오는 시간을 재거나, 개선된 2차 레이더 방식에서는 항공기에 실린 트랜스폰더에 질문을 보내고, 트랜스폰더가 1090 MHz로 식별 부호와 고도를 담아 대답하는 식이죠. 하지만 레이더에는 한계가 있어요. 엄청난 전력이 필요하고, 안테나가 한 바퀴 돌 때마다 한 번씩만 항공기를 볼 수 있으며, 바다나 산악 지대는 감시하지 못해요.

ADS-B(Automatic Dependent Surveillance - Broadcast, 자동 종속 감시 - 방송)는 문제를 거꾸로 뒤집어요. 요즘 항공기는 모두 위성 항법 수신기를 싣고 있어서 자기 위치를 몇 미터 정확도로 알고 있어요. ADS-B는 그저 항공기의 트랜스폰더가 그 위치를 식별 부호, 고도, 속도와 함께 1초에 약 두 번씩 1090 MHz로, 특정한 누군가가 아니라 모두에게 알리게 하는 거예요. 아무것도 신호를 보내라고 요청하지 않으니 '자동', 정보가 전적으로 항공기 자신의 계기에서 나오니 '종속', 항공기가 어디 있는지 아는 것이 목적이니 '감시', 듣는 사람 누구에게나 암호 없이 보내니 '방송'이에요. 2020년부터 유럽과 미국 공역의 대부분 항공기에 의무화되었어요. 관제사는 레이더와 함께 ADS-B를 쓰고, 다른 항공기들은 서로를 보기 위해 ADS-B를 쓰며, 학교 옥상에 놓인 25유로짜리 USB 수신기도 똑같은 메시지를 들을 수 있어요.

이 시스템을 이해하려면 다섯 가지를 알아야 하고, 그 하나하나가 한 과씩이에요. 메시지를 실어 나르는 전자기파, 항공기에 위치를 알려 주고 자기 위치를 말하지 않는 항공기를 네트워크가 찾아낼 수 있게 해 주는 시간 측정, 디지털 메시지와 그 안의 오류를 잡아내는 방법, 메시지가 들리는 거리를 제한하는 기하학과 에너지, 그리고 메시지를 다시 데이터로 바꾸는 안테나와 수신기예요. 전체 이야기는 기본 과정에 있어요. 3과 전에 기본 과정의 3장과 5장을, 4과와 5과 전에 6장부터 8장까지를 읽어 두세요.

1과

파동: 눈에 보이지 않는 빛, 전파

메시지는 전자기파가 되어 항공기를 떠나요. 진동하는 전기장과 자기장이 매질 없이 빛의 속력 c = 3.00 x 10^8 m/s로 공간을 퍼져 나가는 거예요. 눈에 보이는 빛도 같은 현상인데 주파수가 더 높을 뿐이에요. 여러분의 눈은 대략 4~8 x 10^14 Hz에 반응하고, ADS-B는 1.09 x 10^9 Hz, 즉 50만 배쯤 낮은 주파수로 송신돼요. 항공기의 메시지와 이 화면에서 나오는 빛은 종류가 다른 것이 아니라 주파수만 다를 뿐이에요.

파동은 정해진 속력으로 나아가므로 주파수가 정해지면 파장도 정해져요. 1초 동안 파동은 c미터를 나아가면서 f번 진동하니까, 한 번의 진동은 c / f미터를 차지해요. 즉 c = f x lambda예요. ADS-B의 경우 lambda = 3.00 x 10^8 / 1.09 x 10^9 = 0.275 m예요. 항공기와 여러분의 안테나 사이를 지나는 파동은 마루와 마루 사이가 27.5 cm로, 스펙트럼에서 휴대전화 신호(17 cm)와 FM 라디오 방송(3 m) 사이에 있어요. 10^6 Hz부터 10^18 Hz까지의 로그 축 위에 스펙트럼을 직접 그리고, FM 라디오, ADS-B, 휴대전화, Wi-Fi, 적외선, 가시광선, X선을 표시해 보세요. 항공기의 파동은 여러분 주머니 속에 있는 물건들의 파동과 이웃해 있어요.

```
c = f x lambda
```

3.00 x 10^8 m/s = 1.09 x 10^9 Hz x 0.275 m

전파는 소리가 아니에요. 소리는 매질 속의 압력파로, 공기 중에서는 343 m/s, 물속에서는 1 500 m/s로 나아가고, 진공에서는 전혀 나아가지 못해요. 전파는 빛이에요. 매질이 필요 없어서 위성에서 항공기까지 진공을 건너올 수 있고, 소리보다 3.00 x 10^8 / 343배, 약 875 000배 빨라요. 30 km 떨어진 항공기가 같은 순간에 소리와 메시지를 내보내면 메시지는 100마이크로초 만에 도착하지만, 소리는 87초 뒤에야 도착하고 그동안 항공기는 22 km를 날아가요. 줄에 생기는 파동은 중요한 성질, 즉 파장과 주파수와 일정한 속력을 빛과 함께 가지고 있어서, 줄을 더 빨리 흔들면 파동이 더 빨라지는 것이 아니라 더 짧아져요. 다른 점은 줄이 있어야 한다는 거예요.

파동의 성질 하나가 5과에서 중요해져요. 바로 편파예요. 전기장은 진행 방향에 수직인 한 방향으로 진동해요. 항공기 안테나는 수직으로 서 있으므로 ADS-B 파동은 수직 편파이고, 옆으로 눕힌 수신 안테나는 이 파동을 거의 받지 못해요. 위아래로 흔든 줄의 파동이 가로로 난 틈에서 막히는 것과 같아요. 안테나를 수평으로 두면 수신기의 수신 거리가 어떻게 될지 지금 예측해 보세요. 프로젝트에서 직접 확인하게 될 거예요.

2과

시간과 위치: 항공기는 자기 위치를 어떻게 알까

모든 ADS-B 메시지의 위치는 위성 항법에서 나오고, 위성 항법은 시간을 재는 일이에요. 각 시스템(GPS, Galileo, GLONASS, BeiDou)마다 약 30개의 위성이 대략 20 200 km 높이에서 돌고 있는데, 위성마다 원자시계를 싣고 있고, 자기 위치와 정확한 송신 순간을 알리는 신호를 보내요. 항공기의 수신기는 신호가 도착한 순간을 기록해요. 그 차이에 c를 곱하면 그 위성까지의 거리가 나와요. 바로 머리 위에 있는 위성에서 오는 신호는 20 200 / 300 000 = 0.0673초가 걸려요. 거리 하나로는 수신기가 그 위성을 중심으로 하는 구 위 어딘가에 있다는 것만 알 수 있어요. 구 두 개가 만나면 원이 되고, 세 개가 만나면 두 점이 되는데, 그중 하나는 지구에서 멀리 떨어져 있어서 버려요. 수신기의 시계가 완벽하다면 위성 세 개면 충분해요. 하지만 수신기에는 몇 마이크로초씩 어긋나는 수정 진동자가 있을 뿐

이고, 1마이크로초는 거리로 300 m예요. 그래서 수신기는 자기 시계의 오차를 네 번째 미지수로 두고 네 번째 위성을 써요. 방정식 네 개, 미지수 네 개(x, y, z와 시계 오차)를 쉬지 않고 풀어요. 덤으로 모든 위성 수신기는 수십 나노초 정확도로 시간을 맞추게 되는데, 이 과의 후반부가 바로 이 사실에 바탕을 두고 있어요.

크기를 꼭 기억해 두세요. 빛은 1나노초에 0.3 m, 1마이크로초에 300 m를 가요. 위치를 3 m 정확도로 알려면 시간을 10 ns 정확도로 재야 해요. 어떤 위성의 시계가 1마이크로초 빠르면, 그 위성을 쓰는 모든 수신기의 위치가 위성 쪽 방향으로 300 m 밀려나요. 그래서 위성 시계는 지상에서 하루에도 몇 번씩 보정돼요.

항공기에는 고도가 두 가지 있어요. 위성 계산으로는 기준 타원체 위의 기하학적 높이가 나와요. 하지만 항공 교통을 위해 방송하는 고도는 기압 고도예요. 동체의 구멍으로 잰 공기의 압력을 국제표준대기(ISA)를 통해 높이로 바꾼 값인데, ISA는 해수면에서 1013.25 hPa, 15도 C이고 1킬로미터마다 6.5도씩 기온이 내려간다고 가정해요. 실제 기압이 표준과 다르면 모든 항공기의 기압 고도가 똑같은 양만큼 틀리게 되는데, 바로 그 점이 항공기 간격 유지에 필요한 거예요. 비행 고도 350과 360을 읽는 두 항공기는 날씨와 상관없이 1 000 ft 떨어져 있어요. 위치 메시지는 기압 고도를 25피트 단위로 담고, 속도 메시지는 기압 고도와 기하학적 높이의 차이를 담아요. 스프레드시트가 있다면 p = p0 (1 - 0.0065 h / 288.15)^5.255를 거꾸로 풀어서 11 000 m에서 기압이 약 227 hPa, 해수면의 4분의 1도 안 된다는 것을 확인해 보세요. 여객기가 날아가는 곳의 공기로는 사람이 의식을 유지할 수 없어요.

이제 생각을 통째로 뒤집어 봐요. 어떤 항공기는 위치 없이 1090 MHz로 송신해요. 레이더에 식별 부호와 고도만 대답하는 옛날 트랜스폰더나, 위성 수신이 방해받고 있는 항공기가 그래요. 그래도 수신기 네트워크는 멀티래터레이션으로 그 위치를 찾을 수 있어요. 시계를 맞춘 수신기 네 대가 같은 송신이 도착한 시각을 각각 기록한다고 해 봐요. 메시지가 수신기 B보다 수신기 A에 1마이크로초 먼저 도착했다면, 그 메시지는 B보다 A에 300 m 더 가까운 지점에서 보내진 거예요. 그런 지점들을 모두 모으면 A와 B를 초점으로 하는 쌍곡면이 돼요. 수신기 네 대로 만든 독립적인 세 쌍은 쌍곡면 세 개를 주고, 그것들이 만나는 곳에 항공기가 있어요. 아는 것과 모르는 것을 맞바꾼 위성 문제예요. 위성 항법에서는 수신기 하나와 위치를 아는 송신기 네 개가 있었고, 여기서는 송신기 하나와 위치를 아는 수신기 네 개가 있어요. 두 경우 모두 재는 것은 시간이고, 1마이크로초는 300 m예요. 수신기들은 항공기가 쓰는 바로 그 위성들로 시계를 약 100 ns 정확도로 맞춰요.

소리로도 해 볼 수 있어요. 운동장의 위치를 정확히 잰 세 지점에 스톱워치를 든 세 사람이 서고, 숨어 있는 네 번째 사람이 손뼉을 한 번 쳐요. 각자 소리가 늦게 도착한 시간을 기록해요. 소리는 343 m/s이니 0.1초 차이는 34 m예요. 축척 그림에 위치를 이리저리 짚어 보거나 쌍곡선을 대충 그려 보면 손뼉 친 사람을 찾을 수 있어요. 그다음 전파로 200 km 거리에서 같은 일을 하려면 스톱워치가 얼마나 정확해야 할지 생각해 보세요. 그러면 네트워크에 왜 원자시계 수준의 시간이 필요한지 알게 될 거예요.

3과

메시지: 112비트, 그리고 오류를 잡아내는 방법

트랜스폰더는 ADS-B를 Mode S 확장 스퀴터로 보내요. 8마이크로초 길이의 프리앰블 다음에, 1마이크로초에 1비트씩 112개의 데이터 비트가 이어져요. 프리앰블은 0, 1, 3.5, 4.5마이크로초에 놓인 펄스 네 개로 된 고정 패턴인데, 여러분이 미처 생각하지 못했을 질문에 답하는 역할을 해요. 잡음과 다른 항공기들의 신호로 가득한 채널에서 수신기는 메시지가 시작되었다는 것을, 그리고 각 비트가 언제 시작되는지를 어떻게 알까요? 디코더는 그 패턴을 쉬지 않고 찾고 있다가, 패턴을 발견하면 두 가지를 모두 알게 돼요. Wi-Fi부터 QR 코드까지 여러분이 쓰는 모든 디지털 프로토콜에는 이와 같은 것이 있어요.

송신기는 켜지거나 꺼질 수만 있는데, 어떻게 1과 0을 보낼까요? ADS-B는 펄스 위치 변조를 써요. 1마이크로초짜리 비트 칸을 반으로 나눠서, 앞쪽 절반에 펄스가 있고 뒤쪽 절반이 조용하면 1, 앞쪽이 조용하고 뒤쪽에 펄스가 있으면 0이에요. 비트마다 펄스는 언제나 정확히 하나예요. 이 방식이 "펄스가 있으면 1, 없으면 0"보다 왜 나은지 생각해 보

세요. 수신기는 0이 길게 이어져도 박자를 잃지 않아요. 단순한 방식이라면 0이 길게 이어지는 것과 아무 신호도 없는 것을 구별할 수 없었을 거예요. 또 수신기는 펄스가 정해진 기준을 넘었는지가 아니라 두 절반 중 어느 쪽이 더 셌는지로 각 비트를 판단하므로, 400 km 밖에서 온 약한 신호도 머리 위에서 온 강한 신호만큼 확실하게 디코딩돼요.

펄스 위치 변조로 나타낸 네 비트: 1, 0, 1, 1



한 칸은 1마이크로초예요. 앞쪽 절반에 펄스가 있으면 1, 뒤쪽 절반에 있으면 0이에요.

112비트는 다음과 같이 배치되어 있고, 여러분은 이것을 외워서 다시 쓸 수 있어야 해요. 1~5번 비트는 다운링크 형식으로, 트랜스폰더에서 보낸 ADS-B는 17이에요. 6~8번 비트는 기능 코드예요. 9~32번 비트는 24비트 ICAO 주소로, 등록할 때 정해지는 항공기의 영구적인 신원이에요. 모두 2^24 = 16 777 216개가 있고 나라별로 묶음으로 나눠 주는데, 벨기에는 16진수로 448000부터 44FFFF까지예요. 33~88번 비트는 56비트 메시지 필드이고, 그 처음 다섯 비트인 타입 코드가 나머지 51비트에 무엇이 들어 있는지 알려 줘요. 타입 코드 1~4는 호출 부호를 6비트 문자 여덟 개로 담는데, 문자마다 64가지 기호를 쓸 수 있어요. 타입 코드 9~18은 공중 위치를 담아요. 25피트 단위의 기압 고도 12비트, 짝수/홀수 표시, 그리고 부호화된 위도와 경도 각 17비트예요. 타입 코드 19는 속도를 담아요. 동서 방향과 남북 방향의 대지 속도 성분, 상승·하강률, 그리고 기압 고도와 기하학적 높이의 차이예요. 89~112번 비트는 24비트 패리티예요. 계산을 확인해 봐요. 25피트 단위의 12비트 고도는 102 400 ft까지 나타낼 수 있어요. 17비트를 위도 180도 전체에 단순하게 쓰면 1.4 km 정도밖에 구별하지 못해요. 실제 위치가 그보다 정확한 것은 컴팩트 위치 보고(CPR) 덕분이에요. 17비트는 어느 구역인지가 아니라 구역 안에서의 위치를 몇 미터 정확도로 알려 주고, 항공기는 짝수와 홀수 두 가지 구역 격자를 번갈아 써요. 둘 다 한 번씩 들은 수신기는 구역을 확실하게 알아내고, 그 뒤로는 메시지 하나만으로도 추적할 수 있어요. 같은 비트로 더 높은 정확도를 얻는 대신 시간을 쓰는 거예요.

DF 5 비트 다운링크 형식	CA 3 비트 기능	ICAO 주소 24 비트 고유한 항공기 신원	ME - 실제 내용 56 비트 처음 5비트의 타입 코드에 따라 위치, 고도, 속도, 호출 부호 또는 상태	PI 24 비트 오류 검사(CRC)

이 페이지 맨 위의 실제 메시지를 해부해 봐요. 8D4840D6202CC371C32CE0576098은 16진수 28자리, 112비트예요. 처음 두 자리 8D는 2진수로 1000 1101이에요. 처음 다섯 비트 10001은 17이니 트랜스폰더에서 보낸 ADS-B이고, 다음 세 비트 101은 기능 5예요. 다음 여섯 자리 4840D6은 ICAO 주소인데, 할당표를 보면 네덜란드예요. 다음 두 자리 20은 00100, 즉 타입 코드 4로 시작하니 식별 메시지이고, 뒤따르는 6비트 문자들을 디코딩하면 호출 부호 KLM1023이 나와요. 마지막 여섯 자리 576098은 패리티예요. 스프레드시트나 몇 줄의 코드로 전체를 디코딩할 수 있어요. 16진수 한 줄을 보고 "KLM 항공기가 1023편이라고 알리고 있네"라고 말할 수 있게 되는 것이 이 과의 목표예요.

패리티는 가장 깊이 생각해 볼 만해요. 붐비는 공항 위에서는 여러 항공기의 송신이 수신기에서 끊임없이 겹치고, 펄스 하나하나가 잡음에 묻혀 사라지기도 해요. 그래서 디코더는 가끔 틀린 비트를 조립할 수밖에 없어요. 마지막 24비트는 순환 중복 검사(CRC)예요. 88개의 메시지 비트를 하나의 긴 2진수로 보고, 뺄셈이 배타적 논리합(XOR)인 특별한 산술로 정해진 25비트 생성 다항식으로 나누면, 그 나머지가 CRC예요. 수신기는 자기가 디코딩한 비트로 같은 나눗셈을 다시 해요. 비트 하나가 뒤집히든, 두 개가 뒤집히든, 24비트 이하 길이로 오류가 몰려 있든 나머지가 달라지

므로 메시지는 버려져요. 먼저 8비트 메시지에 4비트 CRC를 손으로 계산해서 원리를 확인하고, 프로그래밍을 할 줄 안다면 실제 CRC-24를 구현해서 예시 메시지가 통과하는지, 그리고 비트 하나만 뒤집어도 실패하는지 확인해 보세요. 이것이 오늘날 모든 시스템이 쓰는 오류 검출이에요. 오류를 하나 놓치면 관제사의 화면에 있지도 않은 유령 항공기가 나타날 수 있는 상황에서 쓰이는 거죠.

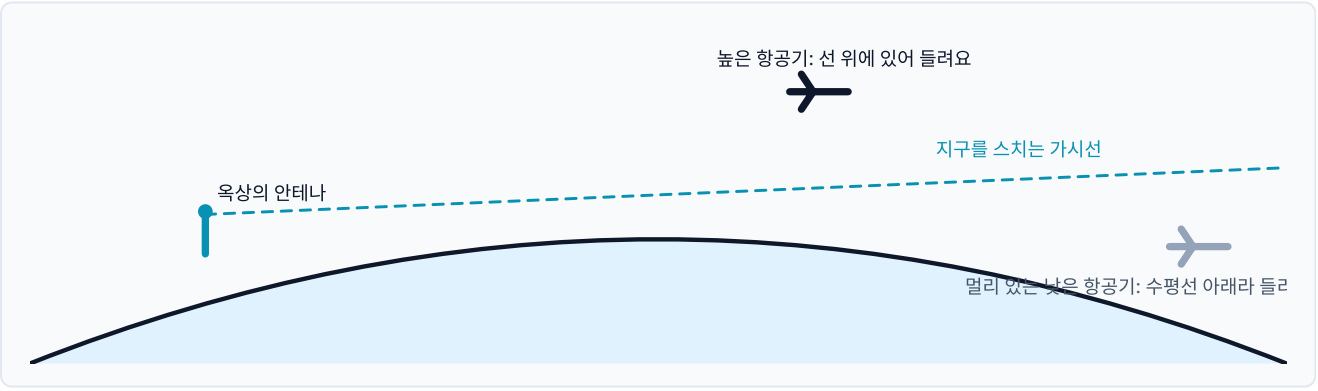
4과

수신 거리: 지구의 곡면과 역제곱 법칙

수신기는 얼마나 멀리 있는 항공기까지 들을 수 있을까요? 서로 다른 두 가지 한계가 있고, 둘을 따로 생각하는 것이 좋아요. 첫 번째는 기하학적 한계예요. 1090 MHz에서 전파는 지구를 따라 휘어 돌아가지 않고 직선으로 나아가요. 그래서 수신기는 자기 수평선 위에 있는 항공기, 즉 안테나까지 그은 직선이 땅에 걸리지 않는 항공기만 들을 수 있어요. 수평선까지의 거리를 유도해 봐요. 반지름 R인 구 위 높이 h에 있는 안테나는 시선이 구에 접하는 곳에서 수평선을 봐요. 접선과 두 반지름은 접점에서 직각을 이루므로 d^2 + R^2 = (R + h)^2이고, 여기서 d^2 = 2Rh + h^2이 나와요. h는 R에 비해 아주 작으니 d = sqrt(2Rh)예요. R = 6 371 km이고 h를 미터로 나타내면 d (km) = 3.57 sqrt(h)예요. 대기는 높이 올라갈수록 굴절률이 작아지기 때문에 전파를 약간 아래로 휘게 해요. 표준 보정에서는 지구 반지름을 실제의 3분의 4배로 보고 3.57 대신 4.12를 써요. 높이 h1의 안테나에서 높이 h2의 항공기까지 전체 가시 거리는 두 수평선 거리의 합이에요.

```
d (km) = 4.12 x ( sqrt(h1) + sqrt(h2) )   with h1, h2 in metres
```

높이 20 m 옥상의 안테나와 11 000 m의 항공기: 4.12 x (4.47 + 104.9) = 451 km. 같은 안테나와 1 000 m의 항공기: 149 km. 30 km 떨어진 활주로 위의 항공기: 4.12 x (4.47 + 2) = 27 km이므로 들리지 않아요.



여러분 안테나의 높이로 h2에 따른 d의 그래프를 그려 보세요. 곡선은 처음에 가파르다가 점점 평평해지는데, 이것이 모든 수신기의 수신 범위 모양을 설명해 줘요. 순항 중인 항공기는 400 km 이상, 접근 중인 항공기는 수십 킬로미터, 지상의 항공기는 바로 옆 공항이 아니면 전혀 들리지 않아요. 또 높이가 수신기의 가장 중요한 성질인 이유, 그리고 언덕이나 건물, 심지어 항공기가 선회하며 기울어질 때 자기 날개 때문에 항적이 순식간에 끊기는 이유도 설명해 줘요.

두 번째 한계는 에너지예요. 트랜스폰더는 수백 와트를 수평 방향 모든 쪽으로 대체로 고르게 내보내요. 거리 d에서 그 전력은 넓이 4 pi d^2인 구면 전체에 퍼지므로, 유효 면적이 일정한 안테나가 받는 전력은 1 / d^2로 줄어들어요. 이것이 역제곱 법칙인데, 외우지 말고 구의 넓이에서 유도해 보세요. 두 배 멀어지면 전력은 4분의 1, 열 배 멀어지면 100분의 1이에요. 엔지니어들은 이 손실을 데시벨로 나타내요. 10 dB는 전력이 10배, 3 dB는 2배라는 뜻인데, 데시벨을 쓰면 여러 자릿수에 걸친 곱셈이 덧셈으로 바뀌기 때문이에요. 단순한 두 안테나 사이의 자유 공간 경로 손실은 다음과 같아요.

```
path loss (dB) = 20 log10( d in km ) + 20 log10( f in MHz ) + 32.44
```

400 km, 1090 MHz에서: 52.0 + 60.7 + 32.4 = 145 dB. 250 W 송신기는 +54 dBm이므로 수신 전력은 54 - 145 = -91 dBm, 약 8 x 10^-13 W예요.

이 숫자에서 잠시 멈춰 볼 만해요. 옥상의 수신기는 항공기를 떠난 신호보다 10^14.5배 약한 신호, 100만분의 1의 100만분의 1 와트를 잡아내고 있는 거예요. 좋은 취미용 수신기는 약 -100 dBm까지 디코딩하므로 400 km에서도 9 dB의 여유가 있어요. 다시 말해 순항 중인 여객기의 경우 에너지 한계와 기하학적 수평선이 거의 같은 곳에 놓이는데, 이것은 일부러 그렇게 설계한 거예요. 트랜스폰더 출력과 수신기 기준은 항공기가 수평선까지는 들리고 그보다 훨씬 멀리는 들리지 않도록 정해졌어요. 그래서 이웃 나라의 항공기 신호로 채널이 넘쳐 나지 않아요.

두 가지를 더 살펴봐요. 도플러 효과: 250 m/s로 다가오는 항공기는 수신 주파수를 f v / c = 1.09 x 10^9 x 250 / 3 x 10^8 = 908 Hz만큼 바꾸는데, 이는 100만분의 1도 안 되어서 수신기는 전혀 알아채지 못해요. 같은 항공기의 소리와 비교해 보세요. 소리에서는 v / c가 250 / 343이라서 항공기가 지나갈 때 음높이가 거의 한 옥타브나 떨어져요. 그리고 전파가 날아가는 시간: 400 km를 c로 가면 1.33 ms가 걸리므로, 방송된 위치는 도착했을 때 이미 1.33 ms 전의 것이고 그동안 항공기는 33 cm를 움직였어요. 지도에서는 무시해도 되지만, 바로 이런 마이크로초를 다루는 멀티래터레이션에서는 결정적이에요.

5과

안테나와 수신기: 27센티미터 파동에서 지도 위의 점까지

안테나는 지나가는 전자기파가 교류 전류를 일으키는 도체예요. 같은 장치에 전류를 흘려 주면 파동을 내보내요. 수신 안테나와 송신 안테나는 같은 것을 반대 방향으로 쓰는 거예요. 유도 전류는 공진할 때 가장 커요. 도체의 길이가 그 위의 전류 분포가 파동의 진동에 딱 맞도록 되어 있을 때인데, 알맞은 길이의 줄이 특정한 음에 공명하는 것과 같아요. 곧은 도체의 기본 공진은 반 파장, 1090 MHz에서 13.75 cm에서 일어나고, 전류는 가운데에서 가장 크고 양 끝에서 0이에요. 항공기와 대부분의 수신기에서 쓰는 실용적인 ADS-B 안테나는 1/4 파장 모노폴이에요. 도전성 접지면 위에 6.9 cm의 수직 소자를 세운 것인데, 접지면이 거울처럼 소자를 비춰서 소자와 그 반사상이 함께 반파장 다이폴이 돼요. 항공기에서는 동체가 접지면이에요. 시판되는 1090 MHz 안테나는 같은 구조를 통 안에 숨겨 두었고, 그것을 여러 번 쌓아 올렸어요. 집에서 만든 안테나는 몇 밀리미터의 오차만으로도 공진이 어긋나서 하늘의 일부밖에 듣지 못해요. 그래서 프로젝트의 수신기는 공장에서 조정된 안테나를 써요.

수직 모노폴은 수평선 방향으로 가장 민감하고 자기 축 방향으로는 전혀 민감하지 않아요. 3차원으로 그린 감도는 안테나가 구멍을 관통하는 도넛 모양이에요. 그래서 여러분의 수신기는 300 km 밖의 항공기는 완벽하게 듣지만, 바로 머리 위를 지나가는 항공기는 몇 초 동안 놓치는데, 이 현상을 직접 지켜볼 수 있어요. 공진 소자 여러 개를 쌓은 콜리니어 안테나는 도넛을 납작하게 만들어서, 머리 위의 구멍을 희생하는 대신 수평선 쪽 감도를 높여요. 이것이 dBi로 나타내는 안테나 이득이고, 이득은 감도를 다시 나누는 것일 뿐 결코 새로 만들어 내지 않아요. 그리고 1과에서 배웠듯이 파동이 수직 편파이므로 안테나는 수직으로 세워야 해요.

안테나와 지도 위의 점 사이에는 네 단계가 있어요. 대역 통과 필터는 1090 MHz를 통과시키고, 수백 메가헤르츠 떨어진 곳에 있는 훨씬 강한 휴대전화 신호를 막아요. 그렇지 않으면 그 뒤의 모든 것이 포화돼 버려요. 안테나 바로 옆의 저잡음 증폭기는 신호가 케이블에 들어가기 전에 천 배로 키워요. 케이블은 1090 MHz에서 10미터마다 약 3 dB, 즉 신호의 절반을 잃기 때문이에요. 케이블 뒤에서 증폭하면 케이블의 잡음까지 함께 증폭하게 돼요. 원래 TV 수신기로 팔리던 20유로짜리 USB 장치인 소프트웨어 정의 라디오는 신호의 주파수를 낮추고 1초에 200만 번 샘플링해서 숫자의 흐름으로 바꿔요. 여기서부터는 프로그래밍이에요. 무료 소프트웨어가 샘플 속에서 프리앰블을 찾고, 1마이크로초 칸마다 어느 절반에 에너지가 더 많은지 재서 112비트를 조립하고, CRC를 계산해서 통과하면 필드를 디코딩

해요. 그다음 트래커가 짝수와 홀수 위치 프레임을 짝짓고, 위치, 속도, 식별 정보를 ICAO 주소별로 합치고, 메시지가 더 이상 오지 않을 때까지 각 항공기의 상태를 유지해요. 메시지가 끊기는 건 대개 항공기가 수평선 아래로 내려갔기 때문이에요.

이 사슬을 각 단계의 양과 함께 그려 보세요. 안테나에서는 나노볼트, 증폭기 뒤에서는 마이크로볼트, 라디오에서는 1초에 200만 개의 샘플, 디코더에서는 1초에 수백 개의 프레임, 트래커에서는 항공기 하나당 기록 하나가 나와요. 지도 위의 점 하나는 사슬의 맨 끝이고, 그 사슬의 고리 하나하나가 이 과정에서 배운 개념이에요. 공진, 필터링, 증폭, 샘플링, 패턴 찾기, 디코딩, 오류 검사, 집계죠. 프로젝트는 이 사슬을 직접 만들고 과정에서 배운 것을 하늘에 비춰 시험해 보는 거예요. 고도에 따른 최대 수신 거리를 재서 수평선 공식과 비교해 보고, 안테나를 실내, 창가, 옥상에 두고, 수직과 수평으로 놓고 비교해 보고, 하루 동안의 교통량을 기록해서 가장 붐비는 시간과 일반적인 순항 고도를 찾고, 원시 메시지를 디코딩해서 직접 짠 코드로 CRC를 검증해 보세요. 그리고 시스템이 던지지만 답하지 않는 질문들을 생각해 보세요. 메시지에는 서명이 없는데, 누군가 유령 항공기를 방송하는 것을 무엇이 막을까요? 항공기는 방해받을 수 있는 위성에 의존하는데, 방해받을 때 관제사에게는 무엇이 보일까요? 그리고 데이터는 항공기를 식별하고 항공기는 사람을 식별할 수 있는데, 누가 누구를 따라갈 수 있어야 할까요?

도전 문제

먼저 종이에 하나씩 풀어 보세요. 확인을 누르면 답과 풀이 과정이 나와요.

1. **1. 1090 MHz 신호의 파장은 얼마이고, 그 신호용 1/4 파장 안테나의 길이는 얼마일까요?**

2. **2. 메시지는 소리보다 몇 배 빠를까요? 30 km 떨어진 항공기가 둘을 동시에 내보내면, 소리가 도착할 때까지 항공기는 얼마나 날아갔을까요?**

3. **3. 수신기 시계가 2마이크로초 틀렸어요. 거리 오차는 얼마나 생길까요? 그리고 위성 수신기에는 왜 위성이 세 개가 아니라 네 개 필요할까요?**

4. **4. 24비트 주소로 몇 대의 항공기를 구별할 수 있을까요? 1마이크로초에 1비트씩 보내는 112비트 메시지는 얼마 동안 이어지고, 프리앰블을 포함한 전체 송신은 얼마 동안일까요?**

5. **5. 메시지 8D4840D6…에서 다운링크 형식과 기능은 무엇이고, ICAO 주소는 무엇일까요?**

6. **6. 수신 안테나가 15 m 높이에 있어요. 9 000 m에 있는 항공기까지, 그리고 300 m에 있는 항공기까지의 전파 수평선은 얼마일까요?**

7. **7. 거리가 두 배가 되면 왜 수신 전력이 4분의 1이 될까요? 200 km에서의 경로 손실은 얼마이고, 400 km에서의 145 dB와 비교하면 어떨까요?**

8. **8. 안테나를 수평으로 눕히면, 그리고 수신기를 옥상에서 1층으로 옮기면 수신 거리가 어떻게 될지 예측해 보세요.**

다음 단계

직접 만들어 보기

이 과에서 배운 모든 것은 창가에서 확인할 수 있어요. 실습 워크숍에는 구입 목록(약 100~150유로, 또는 이미 가지고 있는 Raspberry Pi), 고를 안테나와 설치할 곳, Dataero 피더를 설치하는 명령 세 개, 그리고 실제 항공기로 공식을 시험하는 측정 방법이 나와 있어요. 전파 수평선, 역제곱 법칙, 하루의 리듬이죠. 여러분의 수신기가 지도에 데이터를 보내면, 수신기가 듣는 모든 항공기가 여러분 스테이션의 이름과 함께 모든 사람의 지도에 그려져요.

실습 워크숍 열기 `https://radar.dataero.eu/ko/learning/workshop`

정답

1. 1. 1090 MHz 신호의 파장은 얼마이고, 그 신호용 1/4 파장 안테나의 길이는 얼마일까요?
   lambda = c / f = 3.00 x 10^8 / 1.09 x 10^9 = 0.275 m예요. 1/4 파장 소자는 6.9 cm예요. 빛의 속력이 일정하기 때문에 주파수와 파장은 반비례할 수밖에 없어요.
2. 2. 메시지는 소리보다 몇 배 빠를까요? 30 km 떨어진 항공기가 둘을 동시에 내보내면, 소리가 도착할 때까지 항공기는 얼마나 날아갔을까요?
   3.00 x 10^8 / 343 = 약 875 000배예요. 메시지는 100마이크로초, 소리는 87초 만에 도착하고, 그동안 250 m/s로 나는 항공기는 22 km를 날아가요.
3. 3. 수신기 시계가 2마이크로초 틀렸어요. 거리 오차는 얼마나 생길까요? 그리고 위성 수신기에는 왜 위성이 세 개가 아니라 네 개 필요할까요?
   2 x 10^-6 s x 3 x 10^8 m/s = 600 m예요. 위성 세 개로 x, y, z를 정할 수 있는 건 시계가 완벽할 때뿐이에요. 시계 오차가 네 번째 미지수이므로 네 번째 위성이 필요해요.
4. 4. 24비트 주소로 몇 대의 항공기를 구별할 수 있을까요? 1마이크로초에 1비트씩 보내는 112비트 메시지는 얼마 동안 이어지고, 프리앰블을 포함한 전체 송신은 얼마 동안일까요?
   2^24 = 16 777 216대예요. 데이터는 112마이크로초 동안 이어지고, 8마이크로초 프리앰블을 더하면 120마이크로초예요.
5. 5. 메시지 8D4840D6…에서 다운링크 형식과 기능은 무엇이고, ICAO 주소는 무엇일까요?
   8D = 1000 1101이에요. 처음 다섯 비트 10001 = 17이니 DF 17, Mode S 트랜스폰더에서 보낸 ADS-B예요. 다음 세 비트 101 = 5이니 CA 5예요. ICAO 주소는 4840D6이고, 네덜란드에 할당되어 있어요.
6. 6. 수신 안테나가 15 m 높이에 있어요. 9 000 m에 있는 항공기까지, 그리고 300 m에 있는 항공기까지의 전파 수평선은 얼마일까요?
   d = 4.12 x (sqrt(15) + sqrt(9000)) = 4.12 x (3.87 + 94.9) = 407 km예요. 300 m라면 4.12 x (3.87 + 17.3) = 87 km예요.
7. 7. 거리가 두 배가 되면 왜 수신 전력이 4분의 1이 될까요? 200 km에서의 경로 손실은 얼마이고, 400 km에서의 145 dB와 비교하면 어떨까요?
   송신된 전력은 넓이 4 pi d^2인 구면에 퍼지는데, 거리가 두 배가 되면 이 넓이가 네 배가 돼요. 200 km에서는 20 log10(200) + 20 log10(1090) + 32.44 = 46.0 + 60.7 + 32.4 = 139 dB로, 400 km보다 6 dB(4배) 작아요.
8. 8. 안테나를 수평으로 눕히면, 그리고 수신기를 옥상에서 1층으로 옮기면 수신 거리가 어떻게 될지 예측해 보세요.
   수평으로 눕히면: 안테나가 수직 파동과 교차 편파가 돼요. 유도 전류는 도체 방향의 전기장 성분에 따라 정해지므로 거의 아무것도 듣지 못해요. 1층으로 옮기면: 수평선 항 4.12 sqrt(h1)이 줄어들고 건물들이 가시선을 막기 때문에, 특히 낮게 나는 항공기의 수신 거리가 크게 줄어들어요.