12~18세 - 교사용

하늘을 해독하기: 하나의 실제 시스템으로 배우는 물리와 컴퓨팅

다섯 개의 수업과 하나의 프로젝트로 구성됩니다. 각 수업은 ADS-B의 한 부분을 골라 그 바탕에 있는 물리나 컴퓨팅을 충분히 전개합니다. 학급이 따라올 수 있는 곳에서는 유도 과정을, 실제 숫자를 쓴 풀이 예제를, 개념을 눈으로 확인하게 해 주는 시연을, 그리고 학생들의 직관이 빗나가는 지점을 다룹니다. 연령대의 아래쪽(12~14세)은 개념과 계산을 따라가고, 위쪽(15~18세)은 유도 과정을 따라가며 프로젝트를 수행합니다.

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

목차

시작하기 전에: 실제 시스템 하나가 다섯 수업의 가치를 지니는 이유
1과 - 물리 파동과 전자기 스펙트럼: 메시지를 실어 나르는 것
2과 - 물리와 수학 시간과 위치: 항공기가 자기 위치를 아는 방법, 그리고 위치를 말하지 않는 항공기를 네트워크가 찾는 방법
3과 - 컴퓨팅 디지털 메시지: 112비트, 그 전송 방법, 그리고 오류를 잡아내는 방법
4과 - 물리 전파와 수신 거리: 지구의 곡면과 역제곱 법칙
5과 - 물리와 공학 안테나와 수신기: 27센티미터 파동에서 지도 위의 점까지
프로젝트 - 2~4주 수신기를 만들고 물리를 하늘에 비춰 시험하기
학생용 도전 문제의 답
다음 단계 프로젝트, 단계별로

시작하기 전에: 실제 시스템 하나가 다섯 수업의 가치를 지니는 이유

12세부터 18세 사이에 배우는 물리의 대부분은 조각조각 나뉘어 가르쳐집니다. 이쪽에는 파동 단원, 저쪽에는 전자기 스펙트럼 단원, 정보 과목에는 디지털 데이터 주제, 지리 과목에는 위성에 관한 언급이 있는 식입니다. ADS-B는 이 모든 조각이 동시에 핵심 역할을 하는 하나의 작동하는 시스템이며, 학급은 교과서보다 싼 수신기로 그 결과를 직접 관찰할 수 있습니다. 항공기는 위성에서 오는 무선 신호의 시간을 재어 자기 위치를 정하는데, 이것은 삼변측량과 빛의 속력입니다. 그 결과를 순환 중복 검사와 함께 112비트에 부호화하는데, 이것은 2진 부호화와 오류 검출입니다. 이 비트를 1090 MHz의 펄스 위치 변조 전파로 송신하는데, 이것은 스펙트럼, 주파수, 파장입니다. 전파는 지구의 곡면에 걸리지 않는 직선을 따라서만 수신기에 닿고, 거리의 제곱에 반비례해 약해져서 도착하는데, 이것은 기하학과 에너지입니다. 1/4 파장으로 조정된 안테나가 전파를 전류로 바꾸는데, 이것은 공진입니다. 그리고 수신기 네트워크는 도착 시간의 차이로부터 위치를 말하지 않는 송신기까지 찾아낼 수 있는데, 이것은 위성 문제를 거꾸로 뒤집은 것입니다. 아래의 각 수업은 이 가운데 하나를 골라 그 자체로 전개하며, ADS-B는 장식이 아니라 줄곧 이어지는 예제로 쓰입니다.

홈페이지의 기본 과정은 시스템 전체를 이야기 형식으로 설명합니다. 학급은 3과 전에 기본 과정의 3장과 5장을, 4과와 5과 전에 6장부터 8장까지를 읽어야 하며, 용어집은 유인물로 쓰기에 좋습니다. 이 페이지는 선생님께서 기본 과정을 읽으셨다고 전제하고 물리와 수업 방법에 집중합니다. 수치 규약은 처음부터 끝까지 같습니다. c = 3.00 x

10^8 m/s, f = 1090 MHz, 높이는 미터, 거리는 킬로미터로 나타내며, 예제에서 따로 말하지 않는 한 순항 중인 항공기는 11 000 m(비행 고도 360), 250 m/s로 봅니다.

직관에 관해 두 가지를 주의하십시오. 학생들은 전파가 소리의 일종이라고, 그리고 "레이더"나 "위성"이 항공기를 본다고 믿은 채로 수업에 들어옵니다. 둘 다 틀렸고, 둘 다 1과와 2과에서 명시적으로 다루지만, 둘 다 다시 나타날 것입니다. 이 과정은 이후의 각 수업이 이를 바로잡을 새로운 이유를 선생님께 제공하도록 짜여 있습니다. 또한 공식에 익숙한 학생들도 크기에는 익숙하지 않은 경우가 많습니다. 이 과정은 매 단계에서 "그게 얼마나 큰가?"를 묻는 데 크게 기대는데, 1마이크로초당 300 m, 145 dB의 경로 손실, 2^24개의 주소 같은 숫자가 물리를 실감 나게 만들기 때문입니다.

1과 - 물리

파동과 전자기 스펙트럼: 메시지를 실어 나르는 것

과정 전체가 기대고 있는 관찰에서 시작하십시오. 항공기의 무선 메시지와 한 줄기의 빛은 같은 물리 현상입니다. 둘 다 전자기파, 즉 진동하는 전기장과 자기장이 어떤 매질도 없이 공간을 퍼져 나가는 것이며, 그 속력 c는 진공에서 모든 주파수에 대해 같고 공기 중에서도 거의 같습니다. 299 792 458 m/s이며, 학급에서는 3.00 x 10^8 m/s로 써도 됩니다. 전파와 가시광선, 가시광선과 X선을 구별하는 양은 진동의 주파수 f뿐입니다. 우리의 망막은 약 4 x 10^14 Hz에서 8 x 10^14 Hz 사이의 주파수에 반응하고, 우리는 이를 빨강에서 보라까지로 느낍니다. ADS-B는 1.09 x 10^9 Hz, 약 50만 배 낮은 주파수로 송신됩니다. 파동 자체는 종류가 다르지 않으며, 우리 눈이 선택적일 뿐입니다.

파동 관계식을 그냥 알려 주지 말고 학급과 함께 유도하십시오. 파동이 속력 c로 나아가며 1초에 f번 진동한다면, 1초 동안 거리 c를 나아가며 완전한 진동 f개를 만듭니다. 따라서 한 번의 진동은 길이 c / f를 차지합니다. 그 길이가 파장 lambda이므로 c = f x lambda입니다. ADS-B에 적용하면 lambda = 3.00 x 10^8 / 1.09 x 10^9 = 0.275 m입니다. 항공기와 수신기 사이의 메시지는 마루와 마루 사이가 27.5 cm입니다. 학생들이 로그 축 위에 직접 그린 스펙트럼에 이것을 표시하게 하십시오. 100 MHz, 3 m의 FM 방송, 1 090 MHz, 27.5 cm의 ADS-B, 1 800 MHz, 17 cm의 휴대전화, 2 450 MHz, 12 cm의 Wi-Fi와 전자레인지, 적외선, 5.6 x 10^14 Hz, 540 nm의 가시광선, 그리고 X선까지입니다. 항공기의 파동을 휴대전화와 전자레인지 사이에 놓아 보는 활동은 어떤 표보다 가치가 있는데, 이것들이 이웃이라는 점을 분명히 보여 주기 때문입니다.

이제 소리와의 혼동을 정면으로 다루십시오. 이 혼동은 누구에게나 있고, 그 대비가 두 현상을 모두 가르쳐 주기 때문입니다. 소리는 매질 속의 종파인 압력파이며, 그 속력은 매질의 성질로서 20도의 공기 중에서 343 m/s, 물속에서 약 1 500 m/s, 진공에서는 0입니다. 전파는 매질이 전혀 필요 없는 횡파인 전자기파로, 진공에서 c로 나아가고 공기 중에서는 알아챌 수 없을 만큼만 느려집니다. 그 차이를 숫자로 나타내 보십시오. 3.00 x 10^8을 343으로 나누면 약 875 000입니다. 30 km 떨어진 항공기가 같은 순간에 소리와 메시지를 내보내면 메시지는 100마이크로초, 소리는 87초 만에 도착하며, 소리가 도착할 때쯤 항공기는 22 km를 날아갔습니다. 시연으로는 교실의 줄과 운동장 건너편으로 비추는 손전등이 좋습니다. 줄의 파동은 분명히 줄이 있어야 하고 줄이 정하는 속력으로 나아가지만, 손전등의 불빛은 아무도 잴 수 없을 만큼 지연 없이 반대편 끝에 닿습니다. 줄이 빛과 공유하는 것(파동, 파장, 주파수, 일정한 속력, 따라서 f와 lambda의 반비례 관계)과 공유하지 않는 것(매질, 초속 몇 미터의 속력)을 명시적으로 정리해 주십시오.

마지막으로 편파를 다루십시오. 보여 주기 쉽고 5과에서 성과를 거둡니다. 전자기파의 전기장은 진행 방향에 수직인 한 방향으로 진동합니다. 항공기 트랜스폰더 안테나는 수직이므로 ADS-B 파동은 수직 편파이며, 수신 안테나도 수직이어야 하고 수평으로 돌리면 거의 아무것도 듣지 못합니다. 위아래로 흔든 줄의 파동은 골판지 상자의 세로 틈은 통과하지만 가로 틈에서는 막힙니다. 값싼 3D 안경에서 떼어 낸 편광 필름 두 장을 창문에 대고 엇갈리게 겹치면 빛에서도 같은 현상을 볼 수 있습니다. 수신 안테나를 눕히면 수신이 어떻게 될지 학급에 예측하게 하십시오. 학생들은 프로젝트에서 그 예측을 시험하게 됩니다.

과제로 낼 풀이 예제
미국의 경항공기가 쓰는 두 번째 ADS-B 시스템은 978 MHz로 송신합니다. 그 파장은 얼마이고, 그에 맞는 1/4 파장 안테나의 길이는 얼마입니까? (0.307 m, 7.7 cm.) 이것을 풀 수 있는 학생은 1과를 이해한 것입니다.

2과 - 물리와 수학

시간과 위치: 항공기가 자기 위치를 아는 방법, 그리고 위치를 말하지 않는 항공기를 네트워크가 찾는 방법

항공기가 자기 위치에 관해 방송하는 모든 것은 위성 항법에서 나오며, 위성 항법은 본질적으로 시간 측정입니다. 약 20 200 km 높이를 도는 각 GNSS 위성은 원자시계를 싣고, 자기 위치와 정확한 송신 순간을 알리는 신호를 보냅니다. 수신기는 도착 순간을 기록합니다. 그 차이에 c를 곱하면 그 위성까지의 거리가 되고, 그런 거리 하나는 수신기를 위성을 중심으로 하는 그 반지름의 구 위에 놓습니다. 학급이 개수를 직접 유도하게 하십시오. 구 두 개는 원에서 만나고, 세 개는 두 점에서 만나는데, 그중 하나는 지표면에서 멀리 떨어져 있어 버릴 수 있습니다. 따라서 수신기의 시계가 완벽하다면 위성 세 개로 충분합니다. 하지만 수신기의 시계는 전혀 그렇지 않으며, 수정 발진기는 필요한 나노초 수준보다 훨씬 크게 어긋납니다. 해법은 이 주제의 우아한 핵심으로, 수신기의 시계 오차를 네 번째 미지수로 두고 네 번째 위성을 쓰는 것입니다. 미지수 네 개(x, y, z와 시계 오차)에 방정식 네 개를 끊임없이 풉니다. 그래서 GNSS 수신기는 위성 네 개가 보여야 하며, 덤으로 수십 나노초 이내의 정확도로 시간을 유지합니다. 이 때문에 5과 네트워크의 수신기들도 항공기와 같은 위성으로 시계를 맞춥니다.

크기를 칠판에 적어 두고 계속 되돌아가십시오. 빛은 1나노초에 0.300 m, 1마이크로초에 300 m를 갑니다. 1마이크로초의 시간 오차는 300 m의 거리 오차입니다. 현대 수신기의 몇 미터 정확도는 10나노초 수준의 시간 측정에 해당합니다. 바로 머리 위 위성에서 오는 데 걸리는 시간은 20 200 km / 3.00 x 10^5 km/s = 0.0673 s이고, 수평선 가까이의 위성에서는 약 0.086 s이므로, 수신기는 몇 밀리초의 차이를 그 1억분의 1 정밀도로 재고 있는 것입니다. 위성의 시계가 1마이크로초 빠르면 어떻게 될지 학급에 물어보십시오. 학생들은 그 위성을 쓰는 모든 수신기가 위성 쪽 방향으로 약 300 m 밀려난다는 것을 알아야 하며, 그래서 위성 시계는 지상에서 하루에 여러 번 보정됩니다.

두 가지 고도를 구별해 주십시오. 메시지에는 둘 다 들어 있고 학생들은 반드시 질문합니다. 위성 계산은 지구 기준 타원체 위의 기하학적 높이를 줍니다. 그런데도 항공기는 기압 고도를 보고합니다. 동체 바깥의 정압을 국제표준대기(ISA)를 통해 높이로 바꾼 값으로, ISA는 해수면에서 1013.25 hPa, 15도이고 1킬로미터마다 6.5도씩 내려간다고 가정합니다. 실제 기압이 표준과 다른 날에는 모든 항공기의 기압 고도가 같은 양만큼 틀리게 되는데, 이것이 바로 간격 유지에 필요한 것입니다. 비행 고도 350과 360을 읽는 두 항공기는 날씨와 관계없이 1 000 ft 떨어져 있습니다. ADS-B 위치 메시지는 기압 고도를 25피트 단위로 담고, 속도 메시지는 기압 고도와 기하학적 높이의 차이를 담으므로 수신기는 둘 다 복원할 수 있습니다. 상급 학생들에게는 ISA 관계식 p = p0 (1 - 0.0065 h / 288.15)^5.255가 좋은 스프레드시트 과제가 됩니다. 식을 거꾸로 풀어 p로부터 h를 구하고, 11 000 m가 약 227 hPa, 해수면 기압의 5분의 1 정도에 해당한다는 것을 확인하게 하십시오.

이제 문제를 거꾸로 뒤집으십시오. 어떤 항공기는 위성 위치 없이 1090 MHz로 송신합니다. 레이더에 식별 부호와 고도만 응답하는 구형 트랜스폰더나 GNSS가 방해받고 있는 항공기입니다. 그래도 수신기 네트워크는 그 위치를 찾을 수 있습니다. 시계를 맞춘 수신기 네 대가 같은 송신의 도착 시각을 기록한다고 합시다. 송신기는 미지이고 수신기는 알려져 있습니다. 이것은 아는 것과 모르는 것의 역할을 맞바꾼 GNSS 문제입니다. 수신기 B보다 수신기 A에 1마이크로초 먼저 도착한 메시지는 B보다 A에 300 m 더 가까운 지점에서 보내졌으며, 그런 점들의 자취는 A와 B를 초점으로 하는 쌍곡면입니다. 수신기 네 대로 만든 독립적인 세 쌍이 쌍곡면 세 개를 주고, 그 교점이 항공기입니다. 이것이 멀티래터레이션이며, 수신기들의 시계가 약 100 ns 이내로 일치해야 하는데, 이는 위성으로부터 얻습니다. 학급에서는 운동장 활동으로 2차원으로 줄여 보십시오. 스톱워치를 든 학생 세 명이 위치를 잰 지점에 서고, 어딘가에 숨은 네 번째 학생이 손뼉을 치면, 세 명은 반응 시간을 보정한 지연을 기록하고, 학급은 343 m/s를 써서 쌍곡선을 그

리거나(더 간단하게는 축척 그림 위에서 위치를 이리저리 짚어 보며) 손뼉 친 학생을 찾습니다. 그다음 전파로 200 km에 걸쳐 같은 일을 하려면 시간 정밀도가 얼마나 되어야 할지 물어, 스톱워치와 원자시계 사이의 간극을 느끼게 하십시오.

과제로 낼 풀이 예제
60 km 떨어진 두 수신기가 50마이크로초 차이로 메시지를 기록했습니다. 항공기는 첫 번째 수신기에 얼마나 더 가까웠습니까? (15 km.) 두 시계가 서로 1마이크로초 어긋나 있었다면 답에 얼마의 오차가 생깁니까? (300 m.) 두 번째 답이 거리에 따라 달라지지 않는 이유를 설명할 수 있는 학생은 멀티래터레이션이 무엇을 요구하는지 이해한 것입니다.

3과 - 컴퓨팅

디지털 메시지: 112비트, 그 전송 방법, 그리고 오류를 잡아내는 방법

항공기의 트랜스폰더는 ADS-B 데이터를 Mode S 확장 스퀴터로 보냅니다. 8마이크로초의 프리앰블 다음에 정확히 1마이크로초에 1비트씩 112개의 데이터 비트가 이어집니다. 수업은 프리앰블로 시작하십시오. 학생들이 아직 생각해 보지 못한 질문, 즉 채널이 잡음과 다른 항공기의 신호로 가득할 때 수신기는 메시지가 시작되었다는 것을 어떻게 아는가에 답해 주기 때문입니다. 프리앰블은 0, 1, 3.5, 4.5마이크로초에 놓인 펄스 네 개로 된 고정 패턴입니다. 디코더는 늘 그 패턴을 찾고 있다가, 찾으면 메시지가 뒤따른다는 것과 각 비트 칸이 정확히 언제 시작되는지를 함께 알게 됩니다. Wi-Fi부터 QR 코드까지 학생들이 접해 본 모든 디지털 프로토콜에는 이와 같은 것이 있으며, 이 순간에 그 점을 말해 주면 좋습니다.

다음은 변조입니다. 무선기는 켜지거나 꺼질 수 있을 뿐인데, 1이나 0은 어떻게 보낼까요? ADS-B는 펄스 위치 변조를 씁니다. 1마이크로초짜리 비트 칸을 두 절반으로 나누어, 앞쪽 절반의 펄스와 그 뒤의 무음은 1, 무음과 그 뒤의 펄스는 0을 뜻합니다. 칠판에 몇 비트를 펄스로 그리고 학급이 읽게 하십시오. 그리고 이 방식이 "펄스가 있으면 1, 없으면 0"이라는 뻔한 방식보다 왜 나은지 물어보십시오. 조금만 이끌어 주면 두 가지 이유가 나옵니다. 비트마다 펄스가 언제나 정확히 하나이므로 수신기는 0이 길게 이어져도 박자를 고정해 둘 수 있고, 펄스가 어떤 절대 기준을 넘었는지가 아니라 어느 절반이 더 셌는지로 각 비트를 판단할 수 있어서 신호가 우연히 얼마나 센지에 디코딩이 영향을 받지 않습니다. 단순한 방식에서 길게 이어지는 0은 무음과 구별할 수 없지만, PPM에서는 뒤쪽 절반 펄스가 꾸준히 울리는 북소리가 됩니다.

펄스 위치 변조로 나타낸 네 비트: 1, 0, 1, 1



한 칸은 1마이크로초입니다. 앞쪽 절반에 펄스가 있으면 1, 뒤쪽 절반에 있으면 0입니다.

이제 112비트의 배치입니다. 학급은 수업이 끝날 때까지 이것을 외워서 다시 쓸 수 있어야 합니다. 1~5번 비트는 다운링크 형식으로, 트랜스폰더에서 보낸 ADS-B는 17입니다. 6~8번 비트는 기능 코드입니다. 9~32번 비트는 24비트 ICAO 주소로, 항공기의 영구적인 신원입니다. 33~88번 비트는 56비트 메시지 필드이며, 그 처음 다섯 비트인 타입 코드가 나머지 51비트에 무엇이 들어 있는지 알려 줍니다. 식별 메시지(타입 코드 1~4)는 여덟 글자의 호출 부호를 6비트 문자 여덟 개로 담고, 공중 위치(9~18)는 기압 고도 12비트, 짝수 프레임인지 홀수 프레임인지를 나타내는 플래그, 부호화된 위도와 경도 각 17비트를 담으며, 속도 메시지(19)는 대지 속도의 동서 성분과 남북 성분, 상승·하강률, 기압 고도와 기하학적 높이의 차이를 담습니다. 89~112번 비트는 24비트 패리티입니다. 계산을 과제로 내십

시오. 24비트 주소는 2^24 = 16 777 216대의 항공기를 구별합니다. 6비트 문자 여덟 개는 문자마다 64가지 기호를 허용하는데, 글자, 숫자, 공백에 충분합니다. 25피트 단위의 12비트 고도는 102 400피트를 나타냅니다. 위도 17비트를 180도 전체에 단순하게 쓰면 1.4 km밖에 구별하지 못하는데, 이는 컴팩트 위치 보고(CPR)가 답하는 질문을 불러옵니다. CPR은 한 문단으로 설명하십시오. 17비트는 어느 구역인지가 아니라 구역 안에서의 위치를 몇 미터 정확도로 주며, 항공기는 짝수와 홀수 두 가지 구역 격자를 번갈아 쓰고, 둘을 하나씩 받은 수신기는 구역을 확실하게 정한 뒤 단일 메시지로 추적할 수 있습니다. 시간을 써서 같은 비트로 더 높은 정밀도를 얻는 깔끔한 예입니다.

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)

학급에 실제 메시지를 주고 해부하게 하십시오. 16진수 문자열 8D4840D6202CC371C32CE0576098은 16진수 28자리, 112비트입니다. 처음 두 자리 8D를 2진수로 바꾸면 10001 101로, DF = 17, CA = 5입니다. 다음 여섯 자리 4840D6은 ICAO 주소이며, 할당표에 따르면 네덜란드에 배정되어 있습니다. 뒤따르는 자리 20 ...은 00100, 즉 타입 코드 4로 시작하므로 식별 메시지이고, 이어지는 6비트 문자들을 디코딩하면 호출 부호 KLM1023이 나옵니다. 마지막 여섯 자리 576098은 패리티입니다. 스프레드시트나 몇 줄의 Python을 쓰면 학급은 한 차시 안에 전체를 디코딩할 수 있으며, 16진수 문자열을 보고 "KLM 항공기가 편명을 알리고 있다"고 말할 수 있는 능력이 목표로 삼을 성취입니다.

> `8D 4840D6 202CC371C32CE0 576098`
>
> 8D: 다운링크 형식 17, 기능 5. 4840D6: ICAO 주소, 네덜란드에 할당. 20...: 타입 코드 4, 식별, 호출 부호 KLM1023. 576098: 24비트 패리티.

패리티로 마무리하십시오. 가장 깊이 전개할 가치가 있는 컴퓨팅 개념이기 때문입니다. 붐비는 공항 위에서는 여러 항공기의 메시지가 수신기에서 끊임없이 겹치고, 펄스가 잡음에 묻혀 사라지기도 하므로, 디코더는 틀린 비트를 조립할 수밖에 없습니다. 끝의 24비트 필드는 순환 중복 검사입니다. 88개의 메시지 비트를 하나의 긴 2진수로 보고, 뺄셈이 배타적 논리합(XOR)인 특별한 산술로 정해진 25비트 생성 다항식으로 나누면 그 나머지가 CRC입니다. 수신기는 디코딩한 비트로 같은 나눗셈을 반복해 비교합니다. 비트 하나가 손상되든, 두 개가 손상되든, 24비트 이하의 연속 오류가 생기든 나머지가 달라지므로 손상된 메시지는 버려집니다. 8비트 메시지에 4비트 CRC를 손으로 계산하거나, 더 간단하게는 바코드의 검사 숫자에 빗대어 작은 규모로 원리를 보여 주십시오. 그다음 상급 학생들에게 실제 CRC-24를 몇 줄의 코드로 구현하게 하고, 예시 메시지의 패리티가 맞게 나오는지, 그리고 비트 하나를 뒤집으면 실패하는지 확인하게 하십시오. 이것이 오늘날 모든 시스템이 쓰는 오류 검출이며, 여기서는 오류 하나를 놓치면 관제사의 화면에 유령 항공기가 나타날 수 있는 맥락에서 만나게 됩니다.

과제로 낼 풀이 예제
완전한 송신 하나는 얼마 동안 이어지며, 트랜스폰더가 1초에 확장 스퀴터 4.5개를 보낸다면 ADS-B를 송신하는 시간은 전체의 몇 분의 몇입니까? (120마이크로초, 1초당 540마이크로초, 0.054퍼센트.) 이 채널에서 송신되는 다른 모든 것을 무시한다면, 채널이 쉬지 않고 사용 중이 되기 전까지 원리적으로 몇 대의 항공기가 채널을 나눠 쓸 수 있습니까? (약 1 850대. 그래서 가장 붐비는 공역에서는 혼잡이 실제 공학적 문제가 됩니다.)

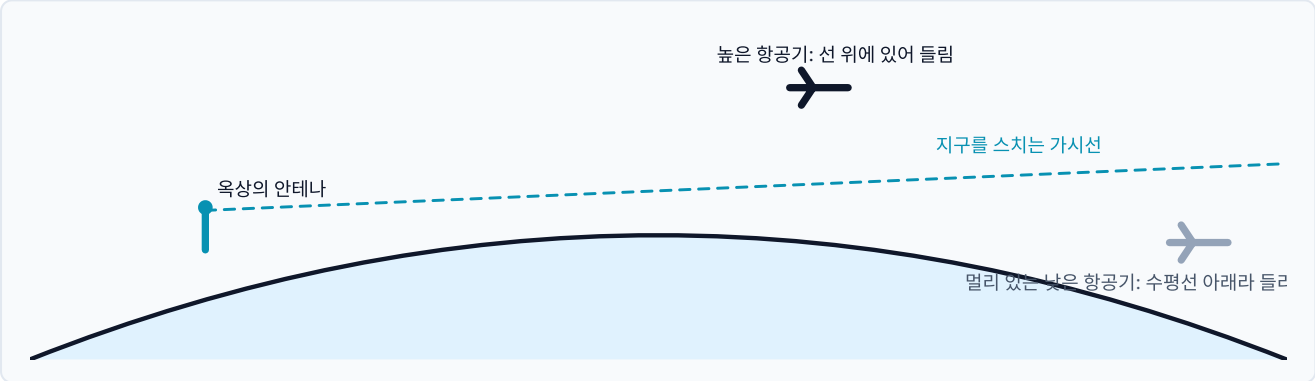
4과 - 물리

전파와 수신 거리: 지구의 곡면과 역제곱 법칙

수신기는 얼마나 멀리 있는 항공기까지 들을 수 있을까요? 이 질문에는 기하학적인 답과 에너지적인 답이라는 서로 독립된 두 가지 답이 있으며, 이 수업의 목적은 둘을 모두 유도하고 설계자들이 둘이 일치하도록 만들어 두었다는 것을 발견하는 것입니다. 기하학부터 다루십시오. 1090 MHz에서 전파는 지구 둘레로 쓸모 있게 회절하지 않고, 빛처럼 직선으로 나아갑니다. 따라서 수신기는 자기 수평선 위에 있는 항공기, 즉 안테나까지 그은 직선이 땅을 지나지 않는 항공기만 들을 수 있습니다. 학급과 함께 수평선 거리를 유도하십시오. 반지름 R인 구 위 높이 h에 있는 안테나는 시선이 구에 접하는 곳에서 수평선을 봅니다. 접선, 접점까지의 반지름, 안테나까지의 반지름은 접점에서 직각을 이루므로 피타고라스 정리에 따라 d^2 + R^2 = (R + h)^2이고, d^2 = 2Rh + h^2이 됩니다. h는 R에 비해 아주 작으므로 d = sqrt(2Rh)입니다. R = 6 371 km이고 h가 미터일 때, 킬로미터 단위의 d = sqrt(2 x 6371 x h / 1000) = 3.57 sqrt(h)입니다. 대기의 밀도, 따라서 굴절률은 높이에 따라 작아지므로 전파의 경로를 약간 아래로 휘게 합니다. 표준 보정은 지구의 반지름을 실제의 3분의 4배로 보고 3.57 대신 4.12를 씁니다. 높이 h1의 안테나에서 높이 h2의 항공기까지 전체 가시 거리는 두 수평선 거리의 합입니다.

$$d\ (\text{km}) = 4.12 \times \left(\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2} \right) \quad \text{with } h_1, h_2 \text{ in metres}$$

높이 20 m 옥상의 안테나와 11 000 m의 항공기: 4.12 x (4.47 + 104.9) = 451 km. 같은 안테나와 1 000 m의 항공기: 4.12 x (4.47 + 31.6) = 149 km. 30 km 떨어진 활주로 위의 항공기: 4.12 x (4.47 + 2) = 27 km이므로 들리지 않습니다.



학급이 자기 학교 안테나의 높이로 h2에 따른 d의 그래프를 그리게 하십시오. 처음에 가파르다가 평평해지는 이 곡선은 모든 수신기의 수신 범위 모양을 설명합니다. 순항 중인 항공기는 반지름 400 km 이상의 원, 접근 중인 항공기는 수십 킬로미터, 지상의 항공기는 바로 옆 공항이 아니면 전혀 들리지 않습니다. 또한 높이가 수신기의 다른 어떤 성질보다 중요한 이유, 그리고 수신기와 공항 사이의 언덕이나 항공기가 선회하며 기울어질 때의 자기 날개가 항적을 순식간에 끊는 이유도 설명합니다. 초등 과정의 운동장 시연, 즉 쪼그려 앉았을 때보다 벤치 위에서 더 멀리 보이는 것은 뒤이어 유도 과정을 다룬다면 이 연령대에도 시시하지 않습니다. 핵심은 학생들이 이제 그 이유를 안다는 점입니다.

이제 에너지입니다. 트랜스폰더는 수백 와트의 첨두 전력을 수평 방향 모든 쪽으로 대체로 고르게 내보냅니다. 거리 d에서 그 전력은 넓이 4 pi d^2인 구면에 퍼져 있으므로, 유효 면적이 일정한 안테나가 받는 전력은 1 / d^2로 줄어듭니다. 이것이 역제곱 법칙이며, 학급은 외우지 말고 구의 넓이에서 유도해야 합니다. 거리가 두 배면 전력은 4분의 1, 열 배면 100분의 1입니다. 무선 엔지니어는 등방성 송신기와 등방성 수신기 사이의 손실을 데시벨로 나타내며, 표준 공식은 다음과 같습니다. 상급 학생들은 이를 그대로 받아들여도 되고, 안테나의 유효 면적 lambda^2 / 4 pi로부터 유도해도 됩니다.

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

400 km, 1090 MHz에서: 20 x 2.60 + 20 x 3.04 + 32.44 = 52.0 + 60.7 + 32.4 = 145 dB. 250 W 송신기는 +54 dBm이므로 수신 전력은 54 - 145 = -91 dBm, 약 8 x 10^-13 W, 즉 100만분의 1의 100만분의 1 와트입니다.

학급이 데시벨을 처음 접한다면 몇 분을 들여 설명하십시오. 데시벨은 14자릿수에 걸친 곱셈을 덧셈으로 바꿔 주며, 그 숫자 자체도 많은 것을 알려 줍니다. 옥상의 수신기는 항공기를 떠난 신호보다 10^14.5배 약한 신호를 잡아내고 있습니다. 좋은 취미용 수신기는 약 -100 dBm까지 디코딩할 수 있으므로 400 km에서 약 9 dB의 여유가 있습니다. 다시 말해 순항 중인 여객기의 경우 에너지 한계와 기하학적 수평선이 같은 곳에 놓입니다. 이것은 우연이 아닙니다. 트랜스폰더 출력과 수신기 기준은 항공기가 수평선까지는 들리고 그 너머로는 별로 들리지 않도록 정해졌으며, 그 덕분에 이웃 나라에서 오는 송신으로 채널이 넘쳐 나지 않습니다.

상급 학생들을 위한 두 가지 보충입니다. 첫째, 도플러 효과: 250 m/s로 다가오는 항공기는 수신 주파수를 f x v / c = 1.09 x 10^9 x 250 / 3 x 10^8 = 908 Hz만큼 바꾸는데, 이는 반송파의 100만분의 1도 안 되어 수신기는 전혀 알아채지 못합니다. 이를 항공기 소리의 귀에 들리는 도플러 효과와 대비해 보십시오. 소리에서는 v / c가 250 / 343이라서 항공기가 지나갈 때 음높이가 거의 한 옥타브나 바뀝니다. 둘째, 신호의 비행 시간: 400 km를 c로 가면 1.33 ms가 걸리므로 메시지 속 위치는 이미 1.33 ms 전의 것이며, 그동안 항공기는 33 cm를 움직였습니다. 지도에서는 무시할 수 있지만, 바로 이런 마이크로초에 기대는 2과의 멀티래터레이션에서는 결정적입니다.

과제로 낼 풀이 예제
높이 10 m 마스트 위의 수신기가 11 000 m에서 순항하는 항공기는 듣지만, 130 km 떨어진 600 m 높이의 경항공기는 듣지 못합니다. 경항공기는 수평선 아래에 있습니까? (수평선: 4.12 x (3.16 + 24.5) = 114 km, 따라서 그렇습니다.) 그것을 들으려면 수신기가 얼마나 높아야 합니까? (4.12 x (sqrt(h1) + 24.5) = 130이어야 하므로 sqrt(h1) = 7.05, h1 = 50 m.)

5과 - 물리와 공학

안테나와 수신기: 27센티미터 파동에서 지도 위의 점까지

안테나는 지나가는 전자기파가 교류 전류를 일으키는 도체입니다. 수신 안테나와 송신 안테나는 같은 장치를 반대 방향으로 쓰는 것이며, 학급에 이 가역성을 명시적으로 말해 주어야 합니다. 유도 전류는 도체가 공진할 때 가장 큽니다. 도체의 길이가 그 위의 전류 분포가 파동의 진동에 맞도록 되어 있을 때로, 알맞은 길이의 줄이 특정한 음에, 그네가 특정한 박자의 밀기에 공명하는 것과 똑같습니다. 곧은 도체의 기본 공진은 반 파장, 1090 MHz에서 13.75 cm에서 일어나며, 전류는 가운데에서 가장 크고 양 끝에서 0입니다. 항공기와 대부분의 수신기에서 쓰는 실용적인 ADS-B 안테나는 1/4 파장 모노폴입니다. 도전성 접지면 위에 세운 6.9 cm의 수직 소자로, 접지면이 전기적으로 소자를 비추어 소자와 그 반사상이 함께 반파장 다이폴을 이룹니다. 항공기에서는 동체가 접지면입니다. 시판되는 1090 MHz 안테나는 같은 구조를 통 안에 숨기고, 감도를 수평선 쪽으로 모으기 위해 여러 번 쌓아 올립니다. 수업 시간에 깡통 뚜껑 위에 6.9 cm 막대를 세워 만든 모형은 구조와 길이를 보여 주며, 27.5 cm 파동과 자로 비교해 볼 수 있습니다. 하지만 프로젝트의 수신기에는 공장에서 조정된 안테나를 씁니다. 몇 밀리미터의 오차만으로도 직접 만든 안테나는 공진이 어긋나 하늘의 일부밖에 듣지 못하기 때문입니다.

복사 패턴을 전개하십시오. 학급이 관찰할 수 있는 것을 예측해 주기 때문입니다. 수직 모노폴은 수평선 방향으로 가장 강하게 송수신하고 자기 축 방향으로는 전혀 송수신하지 않습니다. 감도를 3차원으로 그리면 안테나가 구멍을 관통하는 도넛 모양입니다. 그래서 수신기는 대개 300 km 밖의 항공기는 완벽하게 듣고, 바로 머리 위를 지나가는 항공기는 몇 초 동안 놓치며, 학급은 자기 수신기로 이 현상을 지켜볼 수 있습니다. 공진 소자 여러 개를 쌓은 콜리니어

안테나는 도넛을 더 납작하게 눌러, 머리 위의 구멍을 대가로 먼 항공기가 있는 수평선 쪽 감도를 높입니다. 이것이 dBi로 나타내는 안테나 이득이며, 이득은 감도를 재분배하는 것일 뿐 결코 새로 만들어 내지 않습니다. 1과의 편파는 이제 프로젝트에서 시험할 실제적인 결과를 낳습니다. 안테나는 수직이어야 합니다.

안테나와 컴퓨터 사이에는 세 단계가 있으며, 각각이 작은 수업 하나입니다. 대역 통과 필터는 1090 MHz를 통과시키고 수백 메가헤르츠 떨어진 훨씬 강한 휴대전화 송신을 막는데, 그렇지 않으면 증폭기가 포화됩니다. 저잡음 증폭기는 수신기 쪽이 아니라 안테나 쪽에 두어, 신호가 케이블에 들어가기 전에 천 배로 키웁니다. 순서가 중요한 이유는 1090 MHz에서 동축 케이블이 10미터마다 신호의 약 절반, 즉 3 dB를 잃으며, 손실 뒤에 증폭하면 신호와 함께 케이블의 잡음까지 증폭하기 때문입니다. 다음은 소프트웨어 정의 라디오입니다. 원래 TV 수신기로 만들어진 20유로짜리 USB 장치로, 신호를 기저대역으로 낮추고 1초에 200만 번 샘플링해 숫자의 흐름으로 바꿉니다. 그 지점부터 무선의 문제는 프로그래밍의 문제가 됩니다. 무료 소프트웨어가 샘플 흐름에서 프리앰블 패턴을 찾고, 1마이크로초 칸마다 어느 절반에 에너지가 더 많은지 재고, 112비트를 조립하고, CRC를 계산해 통과하면 필드를 디코딩합니다. 그다음 트래커가 짝수와 홀수 위치 프레임을 짝짓고, 위치, 속도, 식별 정보를 ICAO 주소별로 합치며, 메시지가 더 이상 오지 않을 때까지 각 항공기의 상태를 유지합니다.

이 사슬을 학급이 직접 그리는 도표로 주고, 각 단계의 양을 적게 하십시오. 안테나에서는 나노볼트의 교류 전류, 증폭기 뒤에서는 마이크로볼트, SDR에서는 1초에 200만 개의 8비트 숫자, 디코더에서는 아마도 1초에 수백 개의 112비트 프레임, 트래커에서는 항공기 하나당 기록 하나입니다. 꼭 전달해야 할 요점은 지도 위의 점 하나가 사슬의 맨 끝이며, 그 사슬의 고리 하나하나가 학생들이 이제 이해하는 개념이라는 것입니다. 공진, 필터링, 증폭, 샘플링, 패턴 찾기, 디코딩, 오류 검사, 집계입니다.

과제로 낼 풀이 예제
케이블이 1090 MHz에서 10 m마다 3 dB를 잃습니다. 그렇다면 20 m 케이블은 신호의 몇 분의 몇을 잃습니까? (6 dB, 4분의 3.) 수신기의 한계가 -100 dBm이고 400 km 떨어진 항공기의 신호가 안테나에서 -91 dBm이라면, 증폭기 없이 신호가 케이블을 견딜 수 있습니까? (아슬아슬하게: -97 dBm. 커넥터에 내린 비나 더 긴 케이블 같은 추가 손실이 조금만 있어도 수평선의 항공기는 사라집니다. 그래서 증폭기는 안테나 쪽에 둡니다.)

프로젝트 - 2~4주

수신기를 만들고 물리를 하늘에 비춰 시험하기

프로젝트는 다섯 수업을 측정으로 바꿉니다. 장비는 USB 소프트웨어 정의 라디오 동글(약 25유로), 공장에서 조정된 1090 MHz 안테나(50~70유로), 몇 미터의 동축 케이블, 그리고 무료 디코더 가운데 하나(dump1090과 그 후속 프로그램들이 표준입니다)를 실행하는 노트북이나 Raspberry Pi입니다. 설치에는 오후 한나절이 걸리며, 소프트웨어는 몇 분 안에 ICAO 주소, 호출 부호, 위치, 고도, 속도가 담긴 항공기 표와 지도를 보여 줍니다. 프로젝트의 모든 것은 수신 전용이며 아무것도 송신하지 않습니다. 학급은 항공 주파수로 송신하는 것이 불법이자 위험하다는 것을 이해해야 합니다. 옥상에 올라가려면 통상적인 학교 승인이 필요하지만, 주요 항공 교통 흐름을 향한 위층 창문만으로도 충분히 좋은 출발점입니다. 이 사이트의 '피더 되기' 페이지는 같은 설치 과정을 단계별로 안내하며, 학교의 수신기가 실시간 지도에 데이터를 보낼 수 있게 해 줍니다.

첫 번째 탐구는 전파 수평선입니다. 디코더는 각 항공기에 대해 마지막으로 수신된 거리와 고도를 보고합니다. 하루 동안 여러 고도 구간별로 항공기가 수신된 최대 거리를 모아 고도에 따른 거리의 그래프를 그리십시오. 학생들에게는 4과의 공식과 안테나 높이가 있으므로, 데이터를 보기 전에 곡선을 예측한 다음 비교해야 합니다. 일치도는 대개 높은 항공기에서는 좋고 낮은 항공기에서는 나쁜데, 그 이유(건물, 지형, 안테나의 머리 위 구멍, 항공기 자체가 만드는 그림자)에 관한 토론은 교과서가 줄 수 없는 이론과 측정의 맞대결입니다. 소프트웨어가 그려 주는 방향별 최원거리 항공기 지도는 수신 범위 속의 그림자로 지역 전체의 지형을 보여 줍니다.

두 번째는 안테나입니다. 안테나를 실내, 창가, 옥상에 두었을 때, 수직으로 세웠을 때와 눕혔을 때, 금속 표면 위에 세웠을 때와 금속에서 떨어뜨려 들었을 때의 메시지 수신율과 최대 거리를 비교하십시오. 각 비교는 1과와 5과의 특정한 주장을 시험하며, 각 결과는 먼저 예측해야 합니다. 편파 시험이 가장 인상적입니다. 눕힌 안테나는 항공기 대부분을 잃습니다.

세 번째는 데이터입니다. 하루 종일의 교통을 기록하고 질문을 던지십시오. 가장 붐비는 시간, 순항 고도의 분포(학생들은 넓게 퍼져 있을 거라 예상하지만 여객기 대부분이 10 000 m와 12 000 m 사이에 있다는 것을 발견합니다), 가장 가까운 공항에서 출발하는 항공기의 상승률, 가장 자주 지나가는 나라의 항공기(ICAO 주소 할당으로 알 수 있습니다) 등입니다. 상급 학생들은 소프트웨어가 기록하는 16진수로부터 원시 메시지를 직접 디코딩하고 자기 코드로 CRC를 검증할 수 있습니다. 30킬로미터 이상 떨어진 협력 학교에 두 번째 수신기가 있고 둘 다 GNSS 타임스탬프를 출력한다면, 두 곳 모두에서 들리는 항공기에 대해 2차원 멀티래터레이션을 시도하고 그 결과를 항공기가 방송한 위치와 비교해 볼 수 있습니다. 이 과정에서 가장 야심 찬, 그러면서도 실제로 가능한 성과입니다.

시스템이 던지지만 답하지 않는 질문들로 마무리하십시오. 메시지에는 서명이 없으므로 송신기가 유령 항공기를 방송할 수 있습니다. 무엇이 시스템을 지켜 주며, 서명된 버전에는 어떤 비용이 들까요? 항공기는 방해받을 수 있는 위성에 의존합니다. 방해받을 때 관제사의 화면은 어떻게 될까요? 데이터는 항공기를 식별하고, 항공기는 사람을 식별할 수 있습니다. 누가 누구를 따라갈 수 있어야 할까요? 수신기를 직접 만든 학급은 이런 질문을 다룰 자격을 얻었으며, 이 질문들은 마지막 에세이나 토론 주제로 좋습니다.

학생용 도전 문제의 답

학생용 페이지에는 수업마다 한두 개씩, 모두 여덟 개의 도전 문제가 있으며, 숙제나 과정 마무리 시험으로 쓸 수 있습니다. 만점 답안에 들어가야 할 풀이와 함께 답을 제시합니다.

1. 1090 MHz의 파장: lambda = c / f = 3.00 x 10^8 / 1.09 x 10^9 = 0.275 m. 1/4 파장 소자: 6.9 cm. 풀이: c = f x lambda이며, 빛의 속력이 일정하므로 반비례 관계가 됩니다.
2. 빛은 소리보다 3.00 x 10^8 / 343배, 약 875 000배 빠릅니다. 30 km에 걸쳐 메시지는 100마이크로초, 소리는 87 s가 걸리며, 250 m/s로 나는 항공기는 그동안 22 km를 움직입니다.
3. 2마이크로초의 시계 오차는 2 x 10^-6 x 3 x 10^8 = 600 m의 거리 오차를 줍니다. 수신기의 시계 오차가 x, y, z와 함께 네 번째 미지수이므로 위성 네 개가 필요합니다.
4. 2^24 = 16 777 216개의 주소. 1마이크로초에 1비트인 112비트 메시지는 112마이크로초, 프리앰블을 포함하면 120마이크로초 동안 이어집니다.
5. 8D4840D6...에서 8D는 10001101입니다. 처음 다섯 비트 10001은 17이므로 DF = 17, Mode S 트랜스폰더에서 보낸 ADS-B 메시지이고, 다음 세 비트 101은 CA = 5입니다. 4840D6은 ICAO 주소입니다.
6. 15 m 안테나에서 9 000 m 항공기까지의 전파 수평선: 4.12 x (3.87 + 94.9) = 407 km. 300 m 항공기의 경우: 4.12 x (3.87 + 17.3) = 87 km.
7. 거리가 두 배가 되면 같은 송신 전력이 네 배 넓이의 구면에 퍼지므로 수신 전력은 4분의 1이 됩니다. 200 km, 1090 MHz에서의 경로 손실: 20 x 2.30 + 60.7 + 32.4 = 139 dB로, 400 km보다 6 dB 작아 4배라는 비율과 일치합니다.
8. 수평으로 눕힌 안테나는 수직 편파 파동과 교차 편파가 되어 거의 수신하지 못합니다. 유도 전류는 도체 방향의 전기장 성분에 따라 정해지기 때문입니다. 1층의 수신기는 수평선 거리 4.12 x sqrt(h1)이 줄어들고 건물이 가시선을 막기 때문에 수신 거리를 잃습니다.

다음 단계

프로젝트, 단계별로

6과의 프로젝트는 수신기가 있다고 전제했지만, 실습 워크숍은 그 수신기를 직접 만듭니다. Raspberry Pi를 한 번도 써 본 적 없는 사람을 위해 쓰였으며, 가격이 적힌 구입 목록, 고를 안테나, 설치 위치와 케이블 손실, Pi 준비, Dataero 피더를 설치하는 명령 세 개, 스테이션 등록, 이득 조정, 그리고 수업마다 하나씩 물리를 하늘에 비춰 시험하는 다섯 가지 측정을 다룹니다. Dataero에 데이터를 보내는 스테이션은 학급에 대시보드, 수신 범위 지도, 그리고 활용할 수 있는 1년치 기록을 제공합니다.

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