기본 강좌 - 모든 성인을 위한

ADS-B란 무엇이며 어떻게 작동하는가

12개 장으로 구성됩니다. 항공이나 무선에 대한 사전 지식은 필요 없습니다. 풀이 예제는 중고등학교 수준의 수학이면 충분하며, 건너뛰어도 흐름을 놓치지 않습니다. 읽는 데 약 50분이 걸립니다.

배우기 - https://radar.dataero.eu/ko/learning/course 2026-11-21

목차

1장 문제: 아무도 볼 수 없는 항공기로 가득한 하늘
2장 ADS-B 이전: 레이더로 항공기 찾기
3장 아이디어: 항공기가 직접 알려 주게 하자
4장 항공기는 자신의 위치를 어떻게 아는가
5장 메시지의 해부
6장 - 물리 파동: 보이지 않는 빛으로서의 전파
7장 - 물리 통달 거리: 지구의 곡률과 신호의 감쇠
8장 - 물리 안테나: 27센티미터 파동 잡기
9장 수신과 디코딩
10장 수신기 한 대에서 대륙 전체의 지도로
11장 어디에 쓰이며, 어디에서 부족한가
12장 간략한 역사
용어집
다음 이론에서 실습으로: 수신기 만들기

1장

문제: 아무도 볼 수 없는 항공기로 가득한 하늘

평범한 평일 하루에 약 30 000편의 항공편이 유럽 영공을 가로지릅니다. 순항 중인 여객기는 초속 약 250미터, 즉 시속 900 km로 움직이며, 서로를 향해 날아가는 두 항공기는 매초 0.5킬로미터씩 가까워집니다. 창밖을 내다보는 조종사에게는 이런 상황이 거의 보이지 않습니다. 고도 10 000미터에서 다른 항공기는 작은 점에 불과하고, 그나마 대부분은 구름에 가려집니다. 하늘은 도로가 그려져 있지 않은 3차원 도로망이며, 그 위의 교통은 빠르면서도 눈에 보이지 않습니다.

항공 교통 관제는 이러한 교통을 서로 떨어뜨려 놓기 위해 존재합니다. 원칙적으로 규칙은 간단합니다. 관제 공역에서 항공기는 수직으로 최소 1 000피트(약 300미터), 또는 정해진 수평 거리만큼 떨어져 있어야 합니다. 수평 거리는 레이더 커버리지 근처에서는 보통 5해리(9.3 km)이고, 대양 상공에서는 훨씬 넓습니다. 이 규칙을 적용하려면 관제사는 담당 구역에 있는 모든 항공기의 위치를 지속적이고 신뢰성 있게 알아야 합니다. 1분 전에 어디에 있었는지가 아니라 지금 어디에 있는지, 얼마나 높이 있는지, 어느 방향으로 가고 있는지를 알아야 합니다. 이 강좌 전체의 주제는 바로 그러한 정보를 얻는 방법입니다. 이를 가리키는 전문 용어가 **감시(surveillance)**입니다.

기억해 둘 숫자
시속 900 km로 나는 항공기는 1분에 15 km, 1초에 250 m를 이동합니다. 갱신이 느리거나 오차가 큰 감시 방식은 바로 이 중요한 거리에서 관제사가 추측에 의존하게 만듭니다.

2장

ADS-B 이전: 레이더로 항공기 찾기

첫 번째 해답은 1930년대 후반에 개발되어 제2차 세계대전 중에 완성된 **1차 레이더**였습니다. 회전하는 대형 안테나가 매우 강력하고 짧은 전파 펄스를 내보냅니다. 펄스가 항공기에 부딪히면 그중 아주 작은 일부가 반사되어 돌아옵니다. 레이더는 펄스가 나간 순간부터 메아리가 돌아올 때까지의 시간을 측정합니다. 전파는 빛의 속도인 초속 300

000 km로 이동하므로, 이 시간으로 거리를 알 수 있습니다. 안테나가 가리키던 방향은 방위를 알려 줍니다. 1차 레이더는 놀라울 만큼 독립적입니다. 항공기에 아무 장비도 필요 없기 때문에 지금도 군에서 사용됩니다. 그러나 분명한 약점도 있습니다. 멀리 있는 항공기에서 돌아오는 메아리는 극도로 약하기 때문에 송신기가 거대해야 합니다. 메아리는 그 항공기가 누구인지, 얼마나 높이 있는지 아무것도 알려 주지 않습니다. 그리고 안테나가 한 바퀴 도는 데 몇 초가 걸리므로 각 항공기는 4~12초에 한 번씩만 포착되며, 그동안 항공기는 최대 3 km를 이동합니다.

두 번째 해답인 **2차 감시 레이더**(SSR)는 항공기를 참여자로 만들었습니다. 지상국이 1030 MHz로 질문, 즉 *질문 신호(interrogation)*를 보냅니다. 항공기에 탑재된 작은 무선기인 **트랜스폰더**가 이 질문을 듣고 자신의 강한 신호로 1090 MHz에서 응답합니다. 응답은 반사된 것이 아니라 송신된 것이므로 레이더 메아리보다 수백만 배 강하고, 컴퓨터가 생성하므로 정보를 실을 수 있습니다. 가장 오래된 방식(Mode A)에서 응답에는 관제사가 부여한 네 자리 식별 코드가 들어 있으며, Mode C에서는 항공기의 고도도 포함됩니다. 1980년대에는 **Mode S**("S"는 selective, 즉 선택적이라는 뜻)가 등장했습니다. Mode S에서는 모든 트랜스폰더가 고유한 24비트 주소를 가지며, 개별적으로 질문을 받을 수 있고, 56비트 또는 112비트 데이터 메시지로 응답할 수 있습니다. 1090 MHz라는 숫자와 Mode S라는 단어를 기억해 두십시오. ADS-B는 이 두 가지 위에 그대로 세워져 있습니다.

2차 레이더는 큰 진보였지만, 여전히 이전 방식과 두 가지 한계를 공유합니다. 항공기는 질문을 받았을 때만 말하므로, 지상에는 여전히 통달 범위 안에 질문을 보내는 지상국이 있어야 하며, 따라서 대양, 사막, 산맥에서는 사용할 수 없습니다. 또한 응답이 어느 방향에서 왔는지 알려면 지상국에 여전히 회전 안테나가 필요하므로, 각 항공기는 여전히 한 바퀴에 한 번만 포착되고, 관제사의 화면에는 부드럽게 움직이는 항공기 대신 몇 초마다 건너뛰는 점이 표시됩니다. 이를 개선하려면 근본적으로 다른 무언가가 필요했습니다. 항공기가 질문을 받지 않고도 자신의 위치를 보고하고, 지상에서는 아무것도 측정할 필요가 없는 방식입니다.

3장

아이디어: 항공기가 직접 알려 주게 하자

1990년대에 이르러, 다른 접근 방식을 가능하게 하는 두 가지 기술이 성숙했습니다. 위성 항법 덕분에 적절한 장비를 갖춘 모든 항공기는 지상의 어떤 레이더가 측정할 수 있는 것보다 훨씬 정확하게 자신의 위치를 알게 되었습니다. 그리고 Mode S 트랜스폰더는 이미 1090 MHz로 데이터 메시지를 보낼 수 있는 무선기를 제공하고 있었습니다. 이 둘을 합치면 논리는 거부할 수 없을 만큼 명확합니다. 지상이 항공기의 위치를 애써 측정하는 대신, 이미 위치를 알고 있는 항공기가 일정한 간격으로 모두에게 그냥 알려 주게 하는 것입니다. 그것이 ADS-B이며, 그 이름을 이루는 네 단어는 이를 정확하게 묘사합니다.

ADS-B는 **자동(automatic)**입니다. 송신을 촉발하는 것이 아무것도 없습니다. 트랜스폰더는 통달 범위 안에 지상국이 있든 없든, 조종사가 무엇을 하든 하지 않든, 자체 일정에 따라 1초에 약 두 번 송신합니다. 실제로 조종사는 비행 중에 트랜스폰더를 끄지 않는 한 이를 멈출 수 없으며, 트랜스폰더를 끄는 것은 금지되어 있습니다. ADS-B는 **종속(dependent)**입니다. 메시지의 모든 항목은 항공기 자체 장비에서 나옵니다. 위치는 위성 수신기에서, 고도는 기압 고도계에서 나오며, 지상은 아무것도 측정하지 않고 전달받은 내용을 신뢰합니다. ADS-B는 **감시(surveillance)**입니다. 그 목적은 항공 교통 관제와 주변 항공기를 위해 다른 이들이 항공기의 위치를 알 수 있게 하는 것으로, 항공기가 스스로 자기 위치를 아는 항법(navigation)이나 조종사와 대화하는 통신(communication)과는 구별됩니다. 그리고 ADS-B는 **방송(broadcast)**입니다. 메시지에는 수신인도, 수신 확인도, 암호화도 없으며, 통달 범위 안에서 수신기를 가진 사람이라면 관제 센터든 다른 여객기든 학교든 누구나 정확히 같은 내용을 듣습니다.

"종속"은 엔지니어들을 걱정하게 만드는 단어이자, 설명할 가치가 가장 큰 단어입니다. 레이더는 독립적인 측정을 합니다. 항공기의 계기가 틀려도 레이더는 상관하지 않습니다. ADS-B는 항공기 자체 항법 시스템의 모든 오차를 물려받으며, 그 시스템이 속거나 고장 나면 방송되는 위치는 똑같이 확신에 찬 채로 틀립니다. 이 때문에 모든 ADS-B 메

시지에는 위치와 함께 항공기가 자신의 위치를 얼마나 신뢰하는지에 대한 정보(5장에서 다루는 무결성 및 정확도 범주)가 담겨 있으며, 레이더도 아직 꺼지지 않았습니다.

"방송"은 이 강좌를 가능하게 하는 단어입니다. 메시지가 암호화되지 않은 채 모두에게 전송되기 때문에, 항공 교통 관제뿐 아니라 1090 MHz에 맞춘 모든 수신기, 여러분이 학교 지붕에 설치할 수도 있는 수신기도 이를 들을 수 있습니다. 같은 특성이 11장에서 다루는 이 시스템의 주된 한계의 원인이기도 합니다. 누구나 읽을 수 있는 메시지는 누구나 위조할 수 있는 메시지이기도 합니다.

4장

항공기는 자신의 위치를 어떻게 아는가

ADS-B의 모든 것은 항공기가 자신의 위치를 안다는 사실에 기반하므로, 이 장에서는 위성 항법을 다룹니다. 일반 용어는 **GNSS**, 즉 범지구 위성 항법 시스템(Global Navigation Satellite System)입니다. 미국의 GPS가 가장 잘 알려져 있으며, 유럽의 Galileo, 러시아의 GLONASS, 중국의 BeiDou도 같은 원리로 작동합니다. 각 시스템은 항공기보다 훨씬 높은 약 20 000 km 고도를 도는 24~30개 정도의 위성으로 이루어진 위성군이며, 각 위성에는 수십억분의 몇 초 수준까지 정확한 원자시계가 실려 있습니다. 각 위성은 사실상 "나는 N번 위성이고, 내 위치는 이러이러하며, 이 신호를 보낸 시각은 정확히 T다"라는 내용의 전파 신호를 끊임없이 송신합니다.

항공기의 수신기는 이 신호를 조금 늦게 듣습니다. 전파가 이동하는 데 시간이 걸리기 때문입니다. 초속 300 000 km로 위성에서 20 000 km를 오는 데는 약 1000분의 67초가 걸립니다. 수신기는 메시지에 찍힌 시각과 도착 시각을 비교합니다. 그 차이에 빛의 속도를 곱하면 그 위성까지의 거리가 됩니다. 거리 하나는 수신기를 그 위성을 중심으로 한 구면 위의 어딘가에 놓습니다. 두 구면은 원에서 만나고, 세 구면은 두 점에서 만나는데, 그중 하나는 보통 터무니없는 위치(땅속 깊은 곳이나 먼 우주 공간)여서 버려집니다. 따라서 수신기에 완벽한 시계가 있다면 위성 세 개로 충분할 것입니다.

하지만 그렇지 않습니다. 원자시계는 수만 유로나 하고 크기도 맞지 않습니다. 수신기에는 필요한 시간 정밀도보다 훨씬 크게 틀릴 수 있는 저렴한 수정 시계가 들어 있습니다. 여기서 우아한 부분이 등장합니다. 수신기는 자신의 시계 오차를 세 개의 위치 좌표와 함께 네 번째 미지수로 취급하고, 네 번째 위성의 신호를 듣습니다. 방정식 네 개, 미지수 네 개. 수신기는 자신의 위치를 구하고, 그 부산물로 자신의 시계를 수십 나노초 이내로 보정합니다. 이것이 위성 수신기가 최소 네 개의 위성을 볼 수 있어야 하는 이유이며, 모든 GNSS 수신기가 덤으로 건물 안에서 가장 정확한 시계 중 하나인 이유입니다.

크기의 규모를 곰곰이 따져 볼 가치가 있습니다. 위성 항법이 사실상 시간 측정의 문제이고 기하학은 부차적이라는 사실을 설명해 주기 때문입니다. 빛은 1나노초에 30센티미터, 1마이크로초에 300미터를 이동하므로, 100만분의 1초의 시간 오차는 300미터의 위치 오차가 되고, 현대 수신기의 몇 미터 수준 정확도는 약 10나노초 수준의 시간 측정에 해당합니다. 구체적인 예를 들어 보겠습니다. 위성이 신호에 12:00:00.000 000 000이라는 시각을 찍고, 항공기의 수신기가 이를 12:00:00.070 000 000에 듣습니다. 이동 시간은 0.070 s이므로 거리는 0.070 x 300 000 km/s = 21 000 km입니다. 만약 수신기 자체의 시계가 단 1마이크로초 빨랐다면 21 000.3 km, 즉 300미터 더 멀게 계산했을 것이고, 같은 오차가 다른 모든 위성까지의 거리에도 스며들었을 것입니다. 바로 이 공통 오차를 네 번째 위성이 드러내고 제거합니다.

고도는 하나가 아니라 둘

위성은 지구의 수학적 표면을 기준으로 한 높이, 즉 *기하* 고도를 알려 줍니다. 그러나 항공기가 항공 교통 목적으로 방송하는 고도는 이것이 아닙니다. 그것은 동체에 있는 정압공(static port)이라는 작은 구멍으로 측정한 항공기 바깥의 기압에서 얻은 **기압 고도**입니다. 기압은 높이에 따라 알려진 방식으로 낮아지며(지면 근처에서는 대략 8미터당 1 hPa, 더 높은 곳에서는 더 천천히), 세계의 모든 고도계는 해수면 1013.25 hPa를 기준으로 하는 같은 표준 대기를

사용해 기압을 높이로 환산합니다. 기압이 평소와 다른 날에는 모든 항공기의 기압 고도가 같은 양만큼 틀리는데, 바로 그것이 핵심입니다. 분리에 중요한 것은 해수면 위의 실제 높이가 아니라, 둘 다 "비행 고도 350"을 읽고 있는 두 항공기가 "비행 고도 340"을 읽고 있는 항공기와 실제로 300미터 떨어져 있다는 사실입니다. ADS-B는 위치 메시지에서 기압 고도를 25피트(7.6 m) 단위로 방송하고, 그것과 위성 높이의 차이를 별도로 방송하므로 수신기는 두 값을 모두 복원할 수 있습니다.

5장

메시지의 해부

전 세계 여객기가 사용하는 ADS-B 메시지는 **확장 스퀴터(extended squitter)**라고 불리는 Mode S 송신입니다. "스퀴터"는 응답이 아니라 자발적으로 보내는 송신을 가리키는 오래된 레이더 은어이며, "확장"이라는 말은 112비트로 원래 Mode S 응답의 두 배 길이이기 때문에 붙었습니다. 엔지니어들은 "1090 MHz extended squitter"를 줄여 "1090ES"라고 씁니다. 각 송신은 총 120마이크로초 동안 지속됩니다. 먼저 수신기가 메시지의 시작을 인식하고 시계를 동기화할 수 있게 해 주는 네 개의 펄스로 된 고정 패턴인 8마이크로초 길이의 *프리앰블*이 오고, 이어서 1마이크로초에 1비트씩 112개의 데이터 비트가 옵니다.

비트를 보내는 방법: 펄스 위치 변조

1마이크로초 길이의 각 비트 슬롯은 두 개의 절반으로 나뉩니다. 앞쪽 절반에 전파 펄스가 있고 뒤쪽 절반이 조용하면 1, 조용한 다음 펄스가 오면 0입니다. 따라서 데이터가 무엇이든 비트마다 정확히 하나의 펄스가 있으며, 수신기는 각 슬롯의 어느 쪽 절반이 더 강했는지만 판단하면 됩니다. 펄스 위치 변조라는 이 방식은 신호가 트랜스폰더에서 멀리 떨어진 안테나까지 가는 동안 겪는 잡음과 페이딩에 강하며, 디코딩하는 비용도 저렴합니다.

펄스 위치 변조로 나타낸 네 비트: 1, 0, 1, 1



각 슬롯은 1마이크로초입니다. 앞쪽 절반에 펄스가 있으면 1, 뒤쪽 절반에 펄스가 있으면 0.

112비트

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

처음 다섯 비트인 다운링크 형식은 이것이 어떤 종류의 Mode S 메시지인지를 나타냅니다. 값 17은 "Mode S 트랜스폰더에서 보낸 ADS-B"를 뜻합니다. 24비트 **ICAO 주소**는 항공기가 등록될 때 부여되는 영구적인 식별자입니다. 가능한 주소는 2의 24제곱, 즉 16 777 216개이며, 유엔의 민간 항공 기구인 ICAO가 국가별로 블록 단위로 할당합니다. 예를 들어 벨기에 항공기는 16진수로 448000부터 44FFFF까지의 주소를 사용합니다. 예전 Mode A의 네 자리 코드와 달리 이 주소는 바뀌지 않고 공유되지도 않으므로, 수신기는 첫 메시지부터 어느 항공기의 신호를 듣고 있는지 확신할 수 있습니다.

56비트 **ME** 필드가 실제 내용이며, 그 처음 다섯 비트인 *타입 코드*가 나머지의 의미를 알려 줍니다. 타입 코드 1~4는 BEL1234나 RYR7KL 같은 항공기의 호출 부호를 6비트 문자 여덟 개로 담습니다. 코드 9~18은 기압 고도와 함께 비행 중 위치를, 20~22는 같은 내용을 위성 고도와 함께 담습니다. 코드 19는 속도를 담습니다. 동서 성분과 남북 성분으로 나눈 대지 속도, 수직 속도, 그리고 기압 고도와 위성 고도의 차이입니다. 코드 28, 29, 31은 상태를 담습니다. 비상 코드, 선택 고도, 그리고 방송된 위치를 얼마나 신뢰할 수 있는지 알려 주는 무결성 및 정확도 범주입니다(예를 들어 "NIC" 값 8은 실제 위치가 보고된 위치로부터 185 m 이내에 있음을 높은 확률로 보장합니다).

마지막 24비트는 **순환 중복 검사(CRC)**로, 앞의 88비트로부터 고정된 다항식 나눗셈으로 계산한 수입니다. 수신기는 디코딩한 비트로 같은 계산을 반복합니다. 결과가 일치하지 않으면 전송 중에 적어도 한 비트가 손상된 것이므로 메시지를 버립니다. 1마이크로초 길이의 펄스는 잡음이나 다른 항공기의 메시지와 겹쳐 쉽게 사라질 수 있으므로, 이 검사가 엉터리 위치가 관제사의 화면에 나타나지 않게 막아 줍니다. 수신기가 기록하는 실제 메시지는 다음과 같습니다.

> `8D` **`4840D6`** `202CC371C32CE0` `576098`
>
> 8D: 다운링크 형식 17, 기능 5. 4840D6: ICAO 주소, 네덜란드 항공기. 20...: 타입 코드 4, 식별 메시지이며 디코딩하면 호출 부호 KLM1023이 됩니다. 576098: 오류 검사.

지구를 34비트에 담기

위치 메시지에는 위도에 17비트, 경도에 17비트밖에 없습니다. 이는 지구 전체를 131 072단계로 나누는 것으로, 적도에서 한 단계가 약 300 m입니다. 턱없이 부족합니다. ADS-B는 **압축 위치 보고(compact position reporting)**로 이 문제를 해결합니다. 지구를 여러 구역으로 나누고, 17비트로 구역 안에서의 매우 정밀한 위치(약 5 m까지)를 나타내되 어느 구역인지는 나타내지 않습니다. 항공기는 약간 다른 두 구역 격자, 즉 "짝수" 메시지와 "홀수" 메시지를 번갈아 보내며, 각각을 하나씩 들은 수신기는 구역을 모호함 없이 알아낼 수 있습니다. 일단 구역을 알면, 항공기가 0.5초 만에 다른 구역으로 건너뛸 수는 없으므로 메시지 하나만으로도 항공기를 추적할 수 있습니다. 비트를 하나도 더 쓰지 않고 유효 정밀도를 두 배로 높이는 깔끔한 기법입니다.

얼마나 자주

비행 중인 트랜스폰더는 위치 메시지를 1초에 두 번, 속도 메시지를 1초에 두 번, 호출 부호를 5초마다 보내고, 상태 메시지는 더 긴 간격으로 보내므로, 모두 합쳐 1초에 약 네다섯 개의 확장 스퀴터를 보냅니다. 각각은 120마이크로초 동안 지속되므로, 트랜스폰더가 실제로 ADS-B를 송신하는 시간은 전체의 1000분의 1에도 훨씬 못 미칩니다. 나머지 시간에는 1030 MHz의 레이더 질문 신호와 다른 항공기의 충돌 회피 질의를 듣고 이에 응답합니다.

6장 - 물리

파동: 보이지 않는 빛으로서의 전파

메시지는 **전파**로 항공기를 떠나며, 이 강좌에서 가장 유용한 단 하나의 개념은 전파와 빛줄기가 같은 것이라는 사실입니다. 둘 다 전자기파입니다. 전기장과 자기장이 함께 진동하는 패턴이 빛의 속도 c, 즉 초속 299 792 458미터, 대략 초속 300 000 km로 공간을 이동하는 것입니다. 전파를 초록빛, 병원의 X선, 주방 전자레인지의 마이크로파와 구별하는 것은 오직 장이 얼마나 빠르게 진동하는가, 즉 헤르츠(초당 진동 횟수)로 측정하는 **주파수** f뿐입니다.

파동은 일정한 속도로 이동하므로, 주파수가 정해지면 한 마루와 다음 마루 사이의 거리인 **파장** lambda가 정해집니다. 1초 동안 파동은 c미터를 이동하면서 f번 진동하므로, 한 번의 진동은 c / f미터를 차지합니다.

$$c = f \times \lambda$$

ADS-B의 경우: lambda = 300 000 000 / 1 090 000 000 = 0.275 m. 항공기와 여러분의 안테나 사이를 오가는 파동은 마루 사이의 간격이 27.5 cm로, 대략 학교에서 쓰는 자 하나의 길이입니다.

파동	주파수	파장	비고
FM 라디오 방송	100 MHz	3 m	자동차 안테나는 이 길이의 일부입니다
ADS-B / Mode S	1 090 MHz	27.5 cm	레이더 트랜스폰더 응답에도 사용
휴대전화(4G 대역)	1 800 MHz	17 cm	스펙트럼상 가까운 이웃
Wi-Fi, 전자레인지	2 450 MHz	12 cm	같은 주파수, 전혀 다른 출력
가시광선(초록빛)	560 000 000 MHz	0.000 54 mm	주파수가 50만 배 높음

뒤에 나오는 모든 내용에 중요한 두 가지 결과가 있습니다. 첫째, 파동은 빛이므로 무언가가 휘게 하거나 막지 않는 한 직선으로 이동하며, 지구를 통과하지 못합니다. 이것이 시스템의 통달 거리를 정하며, 7장의 주제입니다. 둘째, 파장이 27.5 cm이므로 이 파동과 가장 강하게 상호작용하는 금속 구조물, 즉 안테나는 그 정도 크기입니다. 이것이 8장의 주제입니다.

전파가 소리가 아닌 이유

아이들뿐 아니라 어른들도 가장 흔히 혼동하는 것이 전파와 소리입니다. 아마 "라디오"가 소리를 내는 상자이기 때문일 것입니다. 이 둘은 전혀 관계없는 현상입니다. 소리는 공기 중의 압력파로, 분자가 이웃 분자를 밀어내는 연쇄입니다. 소리는 이동할 물질이 필요하고, 초속 340 m로 움직이며, 진공을 건널 수 없습니다. 전파는 아무것도 필요하지 않습니다. 위성과 항공기 사이의 진공을 건너며, 거의 100만 배 빠르게 움직입니다. 항공기의 엔진 소음과 ADS-B 메시지는 같은 순간에 항공기를 떠나지만, 20 km 떨어진 수신기에 메시지는 67마이크로초 만에 도착하고 소리는 꼬박 1분 뒤에 도착합니다.

왜 1090 MHz인가

이 주파수는 물려받은 것입니다. 1950년대의 국제 협정으로 960~1215 MHz 대역이 항공 무선 항행용으로 지정되었고, 1090 MHz는 2차 레이더 트랜스폰더의 응답 주파수가 되었습니다. ADS-B를 설계할 때, 모든 여객기에 이미 장착된 트랜스폰더를 재사용하는 것이 새 무선기를 설치하는 것보다 훨씬 저렴했으므로, ADS-B는 Mode S 트랜스폰더가 1090 MHz로 말하는 또 하나의 내용이 되었습니다. 미국에서는 약 5 500 m 이하로 비행하는 소형 항공기가 대신 978 MHz의 UAT라는 별도 시스템을 사용할 수 있으며, 그래서 그곳의 수신기는 두 주파수를 모두 수신하는 경우가 많습니다.

7장 - 물리

통달 거리: 지구의 곡률과 신호의 감쇠

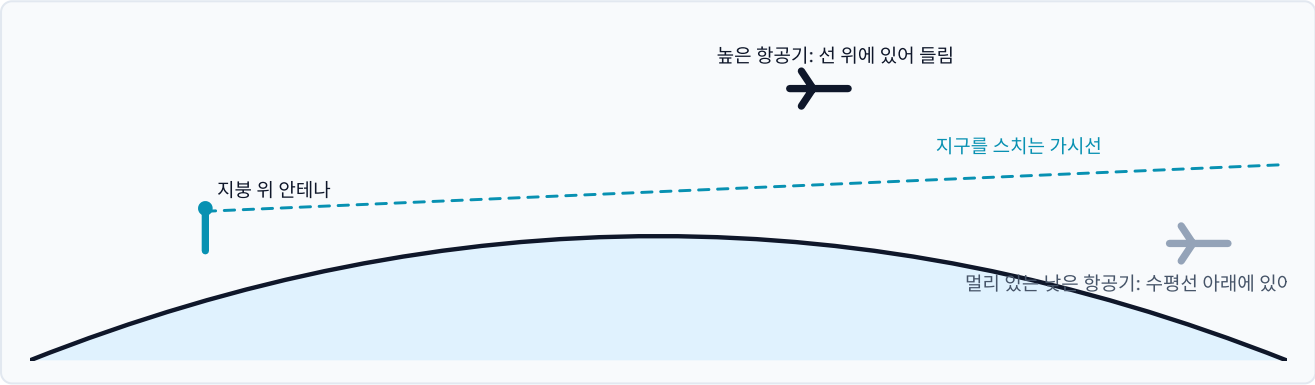
트랜스폰더는 수백 와트의 첨두 출력으로 송신합니다. 이런 신호는 얼마나 먼 곳에서 들을 수 있을까요? 이를 제한하는 것은 전혀 다른 두 가지이며, 둘을 구분해 두는 것이 좋습니다. 하나는 딱 떨어지는 경계를 정하는 기하학이고, 다른 하나는 완만한 경계를 정하는 출력입니다.

전파 수평선

1090 MHz에서 전파는 빛처럼 행동합니다. 직선으로 이동하며 지구를 따라 휘지 않습니다. 따라서 지상 안테나는 둘 사이에 땅을 통과하지 않는 직선이 있을 때만 항공기의 신호를 들을 수 있습니다. 지표면에 있는 관측자에게 수평선은 그 직선이 지구를 겨우 스치는 지점입니다. 항공기가 높을수록 그 접점은 멀어지고, 안테나가 높을수록 더 멀어집니다. 구에 대한 접선의 기하학은 간단한 결과를 줍니다. 수평선까지의 거리(킬로미터)는 높이(미터)의 제곱근에 약 3.57을 곱한 값입니다. 대기가 전파를 약간 아래로 휘게 해 수평선을 15퍼센트 정도 늘리므로, 엔지니어들은 대신 4.12를 사용합니다.

```
d (km) = 4.12 x ( sqrt(h aircraft) + sqrt(h antenna) )   heights in metres
```

고도 11 000 m의 항공기, 20 m 높이 지붕 위의 안테나: 4.12 x (104.9 + 4.5) = 451 km. 고도 1 000 m의 항공기, 같은 지붕: 4.12 x (31.6 + 4.5) = 149 km. 15 km 떨어진 지상의 항공기: 사이의 땅이 평평하고 막힘이 없지 않은 한 전혀 들리지 않습니다.



이것으로 수신기 커버리지의 특징적인 모양이 설명됩니다. 높이 나는 항공기에 대해서는 반경 400 km 이상의 원이고, 접근 중인 항공기에 대해서는 수십 킬로미터로 줄어들며, 지상의 항공기는 바로 옆 공항을 제외하면 거의 잡히지 않습니다. 또한 수신기의 높이가 수신기의 품질보다 훨씬 중요한 이유, 그리고 언덕이나 높은 건물, 심지어 항공기가 여러분 반대쪽으로 선회할 때 그 항공기 자신의 날개까지도 신호를 순식간에 끊어 버릴 수 있는 이유도 설명됩니다.

역제곱 법칙

수평선 안에서는 거리에 따라 신호가 약해집니다. 트랜스폰더 안테나는 모든 수평 방향으로 전파를 내보내므로, 그 출력은 점점 더 커지는 구면 위로 퍼져 나갑니다. 구의 면적은 반지름의 제곱에 비례해 커지므로, 일정한 크기의 안테나에 닿는 출력은 거리의 제곱에 비례해 줄어듭니다. 두 배 멀어지면 출력은 4분의 1, 열 배 멀어지면 100분의 1이 됩니다. 엔지니어들은 이를 데시벨 단위의 *경로 손실*로 나타내는데, 1090 MHz에서 400 km 거리이면 약 145 dB가 됩니다. 즉 수신 출력이 송신 출력보다 약 10의 14.5제곱 배 작다는 뜻입니다. 250와트의 펄스가 대략 1밀리와트의 100억분의 1 정도로 도착합니다. 좋은 수신기는 이를 간신히 검출할 수 있으며, 그래서 기하학적 수평선과 출력의 한계가 공교롭게도 수백 킬로미터에서 일치합니다. 시스템이 그렇게 설계되었기 때문입니다.

두 한계는 이해해 둘 만한 방식으로 상호작용합니다. 수평선 안에서는 가까운 항공기의 강한 신호와 먼 항공기의 약한 신호가 모두 완벽하게 디코딩됩니다. 5장의 펄스 위치 방식은 신호가 얼마나 강한지가 아니라 각 비트 슬롯의 어느 쪽 절반이 더 강했는지만 묻기 때문입니다. 항공기가 멀어진다고 해서 신호가 점차 쓸모없어지는 것이 아니라, 수평선 근처 어딘가에서 기하학이 신호를 끊거나 수신기의 잡음이 마침내 신호를 덮어 버릴 때까지 계속 디코딩할 수 있는 상태로 유지되다가, 그 순간 항적이 끊깁니다. 이것이 커버리지 지도의 경계가 선명한 이유이며, 수신기가 듣는 가장 먼 항공기가 거의 언제나 가장 높이 나는 항공기인 이유입니다.

8장 - 물리

안테나: 27센티미터 파동 잡기

안테나는 지나가는 전자기파가 그 안의 전자를 파동에 맞춰 움직이게 하도록 모양을 낸 도체 조각으로, 이렇게 생긴 아주 작은 교류 전류를 수신기가 증폭할 수 있습니다. 송신기에서는 그 반대가 일어납니다. 항공기 안테나에 흐르는 교류 전류가 파동을 내보냅니다. 이 주고받음의 효율은 파장에 대한 도체의 크기에 따라 달라집니다. 곧은 도선은 길이가 반 파장일 때 가장 강하게 반응, 즉 *공진*합니다. 그 길이에서는 도선을 따라 오가는 전류가 파동의 진동과 정확히 맞아떨어지기 때문인데, 마치 그네를 고유한 리듬에 맞춰 밀어 주는 것과 같습니다. 1090 MHz에서 반 파장은 13.75 cm입니다.

가장 흔한 실용적 형태는 **1/4 파장 모노폴**입니다. 길이가 4분의 1 파장, 즉 6.9 cm인 수직 막대를 *접지면(ground plane)*이라는 도전성 표면 위에 세운 것입니다. 접지면은 거울 역할을 하므로 막대와 그 반사상이 함께 반파장 안테나처럼 동작합니다. 이것이 항공기의 ADS-B 안테나가 동체(이것이 접지면입니다) 위에 몇 센티미터 높이로 솟은 뭉툭한 블레이드인 이유이며, 아마추어의 안테나가 깡통 뚜껑 위에 꽂은 짧은 도선인 이유입니다. 길이가 맞지 않는 도선도 작동은 하지만 성능이 훨씬 떨어집니다. "금속 귀"는 주파수에 맞춰 조율되어 있는 것입니다.

안테나의 세 가지 추가 특성이 물리에서 비롯되며, 각각 눈에 보이는 결과를 낳습니다. 첫째는 **편파**입니다. 전자기파의 전기장은 진행 방향에 수직인 특정 방향으로 진동하며, 안테나는 자신의 길이 방향을 따르는 전기장 성분에만 반응합니다. 항공기 안테나는 수직으로 장착되어 있으므로 ADS-B 파동은 수직 편파로 도착하며, 수신 안테나도 수직이어야 합니다. 안테나를 옆으로 눕히면 거의 아무것도 들리지 않습니다. 위아래로 흔든 밧줄의 파동이 가로로 난 틈에서 막히는 것과 같습니다. 둘째는 **복사 패턴**입니다. 수직 안테나는 수평선 방향으로 가장 감도가 높고 자기 축 방향으로는 전혀 감도가 없어서, 3차원에서 감도의 모양은 안테나가 구멍을 관통하는 도넛 모양입니다. 그래서 수신기는 300 km 떨어진 항공기는 어려움 없이 듣는 반면, 바로 머리 위를 지나는 항공기는 몇 초 동안 놓치는 일이 흔하며, 이는 실시간 지도에서 눈여겨볼 만한 현상입니다. 공진 소자 여러 개를 위아래로 쌓으면 도넛이 더 납작해져, 머리 위 방향을 희생하고 먼 항공기가 있는 수평선 방향으로 감도가 집중됩니다. 이것이 안테나 **이득**이 뜻하는 바이며, 이득은 언제나 감도의 재분배일 뿐 결코 감도를 새로 만들어 내는 것이 아닙니다.

셋째는 안테나와 수신기 사이에 무엇이 있는가에 관한 것입니다. 안테나는 1090 MHz뿐 아니라 주변의 모든 신호를 받아들이는데, 여기에는 수백 메가헤르츠 떨어져 있지만 훨씬 강한 휴대전화 송신도 포함되므로, 항공 대역만 통과시키는 필터를 맨 앞에 둡니다. 그다음 신호는 케이블을 따라 내려가야 하는데, 1090 MHz에서 동축 케이블은 10미터마다 신호의 대략 절반을 잃습니다. 해결책은 저잡음 증폭기를 수신기 쪽이 아니라 케이블 앞, 안테나 쪽에 두어 신호가 이동을 견딜 만큼 강해지게 하는 것입니다. 수신기 쪽에서 증폭하면 남은 신호와 함께 케이블의 잡음까지 증폭하게 됩니다. 사소해 보이지만, 학교 지붕 위의 수신기가 수평선의 항공기까지 들을지 근처의 항공기만 들을지를 결정하는 것이 바로 이런 세부 사항입니다.

9장

수신과 디코딩

안테나와 지도 위의 점 사이에는 다섯 단계로 된 사슬이 있습니다. 안테나는 지나가는 파동을 몇 마이크로볼트의 교류 전류로 바꿉니다. 필터와 저잡음 증폭기가 1090 MHz 대역만 남기고 나머지를 모두 걸러 내며 신호를 천 배로 키웁니다. 소프트웨어 정의 라디오가 그 주파수에 맞춰 신호를 1초에 200만 번 샘플링해 숫자의 흐름으로 바꿉니다. 디코더가 그 흐름에서 프리앰블 패턴을 찾아 112비트를 읽어 내고, 패리티를 검사하고, 필드를 디코딩합니다. 그리고 트래커가 각 항공기의 메시지를 모아 위치, 항적, 레이블로 이루어진 하나의 기록으로 계속 갱신합니다.

주목할 만한 단계는 세 번째입니다. 2010년경까지 1090 MHz를 디코딩하려면 수천 유로짜리 전용 하드웨어가 필요했습니다. 그러다 아마추어들이 20유로짜리 USB TV 튜너에 어떤 주파수에든 맞추어 원시 신호를 컴퓨터에 넘겨주도록 명령할 수 있는 칩이 들어 있다는 사실을 발견했습니다. 이 **소프트웨어 정의 라디오**는 무선의 문제를 프로그래

밍의 문제로 바꿉니다. 노트북이나 Raspberry Pi가 신호 세기를 나타내는 초당 200만 개의 숫자 흐름을 받으면, 무료 소프트웨어가 프리앰블 패턴을 찾고, 각 마이크로초 슬롯의 어느 쪽 절반이 더 강한지 측정하고, 112비트를 조립하고, CRC를 계산하고, 필드를 출력합니다. 중고등학교 키트의 수신기 프로젝트가 바로 이 사슬이며, 학교에서 100유로 미만으로 만들 수 있습니다.

트래커 단계에서 메시지의 흐름이 지식이 됩니다. 기억하시겠지만, 위치 메시지 하나만으로는 짝수 메시지와 홀수 메시지가 짝지어질 때까지 모호합니다. 속도는 위치와 따로 도착하고, 호출 부호는 또 따로 도착합니다. 트래커는 ICAO 주소를 기준으로 이들을 엮고, 오류 검사를 통과하지 못한 것은 모두 버리며, 각 항공기의 마지막으로 알려진 상태를 보관합니다. 1분 동안 메시지가 오지 않으면(보통 항공기가 수평선 아래로 내려갔기 때문입니다) 항적은 만료됩니다.

10장

수신기 한 대에서 대륙 전체의 지도로

수신기 한 대는 지름 수백 킬로미터의 하늘을 듣습니다. 유럽 지도를 만들려면 수백 대가 필요하며, 쓸모 있는 수신기는 도시에 모여 있는 것이 아니라 해안, 계곡, 섬 등 다른 수신기의 원이 닿지 않는 곳곳에 퍼져 있는 것들입니다. 각 수신기는 디코딩한 메시지에 각각 도착 시각을 찍어 인터넷을 통해 중앙 서비스로 보냅니다. 그 서비스는 데이터를 *집계*합니다. 높이 나는 항공기의 같은 메시지는 보통 열 대나 스무 대의 수신기에서 동시에 도착하므로, 중복을 알아보고 병합해야 합니다. 또한 검사도 합니다. 같은 항공기에 대해 이웃한 모든 수신기의 관측과 맞지 않는 위치는 아마도 디코딩 오류나 트랜스폰더 고장이므로 표시를 해 두거나 버립니다.

멀티래터레이션: 자기 위치를 말하지 않는 항공기 찾기

모든 항공기가 위치를 방송하는 것은 아닙니다. 오래된 트랜스폰더는 레이더에 식별 정보와 고도로 응답하지만 위성 입력이 없으며, 일부 항공기는 일부러 위치를 보내지 않습니다. 그래도 이들의 1090 MHz 송신은 지상에 도달하며, 네트워크는 위성 항법을 뒤집어서 이들의 위치를 찾을 수 있습니다. 시계가 정밀하게 동기화된 수신기 네 대가 같은 송신이 도착한 순간을 각각 기록하면, 그 순간들의 차이가 거리의 차이를 드러냅니다. 수신기 A에 수신기 B보다 1마이크로초 먼저 도착한 메시지는 B보다 A에 300 m 더 가까운 지점에서 송신된 것입니다. 이 성질을 가진 모든 점은 A와 B 사이의 휘어진 곡면, 즉 쌍곡면 위에 놓입니다. 수신기 네 대에서 얻은 이런 곡면 세 개가 항공기 위치에서 만납니다. 이것이 **멀티래터레이션**이며, 수백 킬로미터 떨어진 수신기들 사이에서 약 10분의 1마이크로초, 즉 30 m 수준의 시간 정밀도가 필요합니다. 수신기들은 항공기가 사용하는 것과 같은 위성에서 이 시각을 얻습니다.

> **같은 아이디어, 두 번**
> 위성 항법: 수신기 하나, 위치를 아는 송신기 넷, 수신기의 위치를 구합니다. 멀티래터레이션: 송신기 하나, 위치를 아는 수신기 넷, 송신기의 위치를 구합니다. 두 경우 모두 실제로 측정하는 것은 시간이며, 1마이크로초는 300미터입니다.

11장

어디에 쓰이며, 어디에서 부족한가

첫 번째 사용자는 항공 교통 관제입니다. 오늘날 유럽 전역의 관제사들은 1초에 두 번 갱신되고 위성 수준의 정확도를 갖춘 ADS-B를 레이더 및 멀티래터레이션과 결합한 융합 영상을 봅니다. 북대서양, 북극, 사하라, 그리고 대부분의 대양처럼 레이더가 한 번도 닿지 못했던 곳에서는 저궤도 통신 위성에 실린 수신기가 ADS-B 메시지를 수신하며, 덕분에 대서양을 횡단하는 항공기 사이의 간격을 이전보다 훨씬 좁힐 수 있게 되었습니다. 두 번째 사용자는 항공기입니다. "ADS-B In"을 갖춘 여객기는 주변 교통을 승무원에게 보여 주고 충돌 회피 시스템에 제공합니다. 공항은 안개 속에서 지상의 항공기와 차량을 추적하는 데 이를 사용합니다. 연구자들은 공개 데이터로 소음, 연료 사용, 비행운, 지연을 연구합니다. 그리고 학교 지붕 위의 수신기도 작게나마 이 모든 일에 참여하는 셈입니다.

이 시스템의 약점은 설계에서 곧바로 비롯되며, 각각은 단순히 나열하기보다 이해할 가치가 있습니다. 메시지는 암호화도 서명도 없이 그대로 방송되므로, 메시지 자체에는 그것이 항공기에서 왔다는 것을 증명하는 아무것도 없습니다. 지상의 송신기가 존재하지도 않는 항공기를 묘사하는 완벽한 형식의 메시지를 불법적으로 방송할 수 있고, 수신기는 아무 문제 없이 그것을 디코딩할 것입니다. 시스템을 보호하는 것은 메시지가 아니라 그 주변의 맥락입니다. 유령 항공기는 레이더에 나타나지 않고, 멀티래터레이션으로도 찾아지지 않으며, 실제 교통처럼 움직이지도 않습니다. 그리고 관제 센터는 끊임없이 교차 확인을 합니다. 암호 서명을 갖춘 프로토콜 버전이 오랫동안 논의되어 왔지만, 걸림돌은 기술적이라기보다 현실적인 것입니다. 전 세계의 모든 트랜스폰더를 바꿔야 하기 때문입니다.

위치가 항공기의 위성 수신기에 종속되어 있으므로, 위성 항법을 방해하는 모든 것은 ADS-B도 방해합니다. 분쟁 지역 근처에서는 위성 신호의 재밍과 스푸핑이 흔해졌으며, 그런 지역을 비행하는 항공기는 위치를 계산하지 못하거나 잘못된 위치를 계산할 수 있습니다. 그러면 그 항공기의 메시지에는 낮아진 무결성 범주가 실리고, 관제사의 시스템이 이를 표시하며, ADS-B가 완전히 대체하도록 의도된 적이 없는 독립적 측정 수단인 레이더가 그 역할을 넘겨받습니다. 따라서 둘의 관계는 후계자와 선임자의 관계가 아니라, 서로 보완적인 약점을 가진 동반자의 관계입니다.

의무 장착 규정은 여객기와 대부분의 대형 항공기에 적용되지만 하늘을 나는 모든 것에 적용되지는 않으므로, 지도는 원래부터 불완전합니다. 관제 공역 밖의 경항공기, 글라이더, 기구, 그리고 많은 군용기는 ADS-B를 전혀 탑재하지 않을 수 있으며, 일부 경항공기는 1090 MHz 수신기로는 들을 수 없는 다른 시스템을 사용합니다. 그리고 방송이 항공기를 식별하기 때문에 그 소유자도 식별할 수 있습니다. 특정 개인 제트기를 추적하는 것은 사실상 특정 인물을 추적하는 것이며, 이 때문에 소유자가 요청하면 항공기의 등록 정보를 가려 주는 프로그램이 생겨났고, 항공기가 전 세계에 방송하는 정보가 동시에 사적인 정보일 수 있는가에 대한 논쟁이 계속되고 있습니다. 물리학이 답을 주지 않는 문제이기 때문에, 상급 학생들에게 던지기 좋은 논쟁거리입니다.

12장

간략한 역사

1935~1945년

영국, 독일, 미국에서 1차 레이더가 개발됩니다. 전쟁이 끝날 무렵에는 "피아 식별(IFF)" 트랜스폰더가 레이더 펄스에 부호화된 응답을 보내는데, 이것이 2차 레이더의 시초입니다.

1950~1960년대

민간 2차 레이더가 표준화됩니다. 1030 MHz 질문 신호, 1090 MHz 응답, Mode A 식별 코드와 Mode C 고도.

1980년대

고유한 24비트 주소와 데이터 메시지를 갖춘 Mode S가 MIT 링컨 연구소에서 개발되어 ICAO에 채택됩니다. GPS가 민간 사용자에게 운용되기 시작합니다.

1990~2000년대

ADS-B가 정의되고 시험 운용됩니다. 특히 레이더 커버리지가 불가능하고 사고가 잦았던 알래스카에서 시험이 이루어졌습니다. 1090 MHz 확장 스퀴터가 국제적으로 표준화됩니다.

2010년대

저렴한 소프트웨어 정의 라디오 덕분에 수신이 취미가 되고, 수천 대의 수신기로 이루어진 자원봉사 네트워크가 등장합니다. 대양 커버리지를 위해 위성에 수신기가 실려 발사됩니다.

2020년

미국(1월)과 유럽연합(6월, 연말까지 전환 기간)에서 관제 공역의 대부분 항공기에 ADS-B 장착이 의무화됩니다. 하늘이 언제 어디서나 말하기 시작합니다.

용어집

ADS-B
Automatic Dependent Surveillance - Broadcast(자동 종속 감시 - 방송). 항공기가 자신의 위치를 방송하는 방식.

기압 고도
표준 대기를 사용해 기압에서 얻은 높이. 항공기가 보고하는 고도.

CPR
압축 위치 보고(compact position reporting). 정밀한 위치를 34비트에 담는 짝수/홀수 방식.

CRC
순환 중복 검사. 모든 메시지의 끝에 붙는 24비트 오류 검사.

확장 스퀴터
ADS-B를 실어 나르는 112비트의 자발적 Mode S 송신.

GNSS
범지구 위성 항법 시스템: GPS, Galileo, GLONASS, BeiDou.

ICAO 주소
항공기 트랜스폰더의 영구적인 24비트 식별자.

Mode S
ADS-B의 기반이 되는 선택적 2차 레이더 표준.

멀티래터레이션
여러 수신기에 신호가 도착한 시간의 차이로 송신기의 위치를 찾는 방법.

경로 손실
역제곱 법칙에 따라 거리에 비례해 신호가 약해지는 현상.

전파 수평선
안테나와 항공기를 잇는 직선이 지구에 가로막히지 않는 가장 먼 거리.

SDR
소프트웨어 정의 라디오: 원시 신호 샘플을 컴퓨터에 넘겨 디코딩하게 하는 튜너.

SSR
2차 감시 레이더: 지상에서 질문하고 트랜스폰더가 응답하는 방식.

트랜스폰더
레이더에 응답하고 1090 MHz로 ADS-B를 송신하는 항공기 무선기.

파장
파동의 연속된 마루 사이의 거리: c / f, 1090 MHz에서 27.5 cm.

다음
이론에서 실습으로: 수신기 만들기

12개 장에 걸쳐 이제 손에 쥘 수 있는 하나의 시스템을 설명했습니다. 실습 워크숍은 이를 오후 한나절의 작업으로 바꿔 줍니다. 100~150유로로 무엇을 살지, 안테나를 어떻게 만들고 어디에 설치할지, Raspberry Pi를 준비하고 Dataero 피더를 설치하는 방법, 그리고 여러분이 들은 항공기가 여러분의 스테이션 이름으로 실시간 지도에 나타나는 모습을 지켜보는 방법을 안내합니다. 위의 모든 장에는 그곳에서 해 볼 측정이 기다리고 있습니다. 실제 항공기로 확인하는 전파 수평선, 신호 열에 나타나는 역제곱 법칙, 하늘의 하루 리듬이 그것입니다.

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