物理と情報 - 12歳から18歳

空を解読しよう

下に示した16進数の列は、実際の航空機が1秒に約2回送っている本物のメッセージです。わずか112マイクロ秒(100万分の112秒)のあいだに、その航空機が誰なのかを伝え、それと対になるメッセージでは、どこにいて、どれくらいの高さを、どれくらいの速さで飛んでいるかを伝えます。このコースでは、それを理解するのに必要なことをすべて順番に学びます。メッセージを運ぶ電波の物理、航空機の位置を決める時間の測定、メッセージを112ビットに詰め込む符号化、どこまで聞こえるかを決める幾何学、そしてそれを自分で受信するために作れる受信機です。

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

目次

ADS-Bとは何か、1ページで
レッスン1 電波:目に見えない光としてのラジオ
レッスン2 時間と位置:航空機はどうやって自分の居場所を知るのか
レッスン3 メッセージ:112ビットと、誤りの見つけ方
レッスン4 受信距離:地球の丸みと逆二乗の法則
レッスン5 アンテナと受信機:27センチメートルの波から地図の上の点まで
チャレンジ問題
次へ 作ってみよう

ADS-Bとは何か、1ページで

> `8D 4840D6 202CC371C32CE0 576098`
>
> 受信機が記録した1つの拡張スキッタ(extended squitter)です。16進数28桁、112ビット。レッスン3までに、このすべてのフィールドを読めるようになります。

航空交通管制は、航空機どうしを安全に離しておくために、すべての航空機がどこにいるかを常に知っていなければなりません。巡航中の旅客機は1秒に250 m進み、レーダー管制下では航空機の間に垂直方向で300 m、または水平方向で9 kmの間隔をとることが決められています。70年のあいだ、それを知る方法はレーダーでした。地上局がパルスを送り、そのエコーが戻るまでの時間を測ります。改良された二次レーダーでは、航空機に積まれたトランスポンダに質問を送り、トランスポンダが1090 MHzで識別番号と高度を答えます。しかしレーダーには限界があります。とても大きな電力が必要で、アンテナが1回転するごとに1回しか各航空機を見られず、海や山を覆うことができません。

ADS-B(Automatic Dependent Surveillance - Broadcast、放送型自動従属監視)は、この問題を逆から考えます。現代の航空機はすべて衛星測位の受信機を積んでいるので、自分の位置を数メートルの精度で知っています。ADS-Bでは、航空機のトランスポンダがその位置を、識別番号・高度・速度といっしょに、1秒に約2回、1090 MHzで、特定の相手を決めずに発信するだけです。「自動(Automatic)」なのは、何かのきっかけがなくても送られるからです。「従属(Dependent)」なのは、情報がすべて航空機自身の計器から来るからです。「監視(Surveillance)」なのは、航空機の居場所を知ることが目的だからです。「放送(Broadcast)」なのは、聞いている人なら誰でも受け取れるように暗号化せずに送られるからです。2020

年からは、ヨーロッパとアメリカの空域を飛ぶほとんどの航空機に義務づけられています。管制官はレーダーと合わせてこれを使い、ほかの航空機はおたがいを見つけるのに使います。そして学校の屋上に置いた25ユーロのUSB受信機も、まったく同じメッセージを受け取ります。

このシステムを理解するには5つのことを理解する必要があり、それぞれが1つのレッスンになっています。メッセージを運ぶ電磁波。航空機に位置を教え、さらに自分の位置を言わない航空機をネットワークが見つけることを可能にする時間の測定。デジタルのメッセージと、その中の誤りの見つけ方。どこまで聞こえるかを決める幾何学とエネルギー。そして電波をデータに戻すアンテナと受信機です。くわしい解説は基本コースにあります。レッスン3の前にその第3章と第5章を、レッスン4と5の前に第6章から第8章を読んでおきましょう。

レッスン1

電波:目に見えない光としてのラジオ

メッセージは電磁波として航空機を離れます。電磁波とは、振動する電場と磁場が、媒質なしで、光の速さc = 3.00 x 10^8 m/sで空間を伝わっていくものです。目に見える光も同じ現象で、周波数が高いだけです。私たちの目はおよそ4から8 x 10^14 Hzに反応しますが、ADS-Bは1.09 x 10^9 Hzで送信されていて、50万分の1の低さです。航空機のメッセージと、この画面から出ている光の違いは種類ではなく、周波数だけなのです。

電波は決まった速さで進むので、周波数が決まれば波長も決まります。1秒間に電波はcメートル進み、f回振動するので、1回の振動はc / fメートルを占めます。つまりc = f x lambdaです。ADS-Bの場合、lambda = 3.00 x 10^8 / 1.09 x 10^9 = 0.275 mです。航空機とあなたのアンテナの間を通る電波は、山と山の間が27.5 cmで、スペクトルの上では携帯電話の電波(17 cm)とFMラジオ局(3 m)の間にあります。このスペクトルを自分で描いてみましょう。10^6 Hzから10^18 Hzまでの対数の軸の上に、FMラジオ、ADS-B、携帯電話、Wi-Fi、赤外線、可視光、X線を置いてみます。航空機の電波は、あなたのポケットの中にあるものたちの仲間なのです。

$$c = f \times lambda$$

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

電波は音ではありません。音は媒質の中を伝わる圧力の波で、空気中では343 m/s、水中では1 500 m/sで進み、真空中ではまったく伝わりません。電波は光なので媒質がいりません。だから衛星から航空機まで真空を越えて届くのです。そして速さは3.00 x 10^8 / 343、およそ875 000倍です。30 km離れた航空機が音とメッセージを同時に出すと、メッセージは100マイクロ秒で届きますが、音は87秒後に届き、そのときには航空機は22 km先まで飛んでいます。ロープの波は、光と大事な性質を共有しています。波長があり、周波数があり、速さが決まっているので、速く揺らすと波が速くなるのではなく短くなります。違うのは、ロープが必要だという点です。

電波の性質のうち、レッスン5で大切になるものが1つあります。偏波です。電場は、進む方向に垂直な、決まった向きに振動しています。航空機のアンテナは垂直なので、ADS-Bの電波は垂直偏波です。横に寝かせた受信アンテナはそれをほとんど受け取れません。縦に揺らしたロープの波が、横向きのすき間では止められてしまうのと同じです。アンテナを水平にしたら受信機の受信距離がどうなるか、いま予想してみましょう。プロジェクトで実際に確かめます。

レッスン2

時間と位置:航空機はどうやって自分の居場所を知るのか

ADS-Bのメッセージに入っている位置はすべて衛星測位から来ていて、衛星測位とは時間の測定です。1つのシステム(GPS、Galileo、GLONASS、BeiDou)につき約30機の衛星が高度およそ20 200 kmを回っています。どの衛星も原子時計を積み、自分の位置と、送信した正確な時刻を伝える信号を出しています。航空機の受信機は、信号が届いた時刻を記録します。その差にcをかけたものが、その衛星までの距離です。真上から来る信号は20 200 / 300 000 = 0.0673秒かかります。距離が1つわかると、受信機はその衛星を中心とする球面の上のどこかにあることになります。2つの球面は円で交わり、3つの球面は2点で交わります。そのうち1点は地球から遠く離れているので捨てます。受信機が完璧な時計を持っていれば、衛星は3機で足ります。でも受信機が持っているのは水晶の時計で、マイクロ秒単位でずれていき、1マイクロ秒は距離にして300 mになります。そこで受信機は自分の時計のずれを4つ目の未知数として扱い、4機目の衛星を使います。4つの式と4つの未知数(x、y、zと時計のずれ)を、休みなく解き続けるのです。そのおまけとして、どの衛星受信機も数十ナノ秒の精度で時刻を保っています。このレッスンの後半は、このことに頼っています。

大きさの感覚をつかんでおきましょう。光は1ナノ秒に0.3 m、1マイクロ秒に300 m進みます。位置の精度が3 mなら、時間の精度は10ナノ秒です。もし衛星の時計が1マイクロ秒進んでいたら、その衛星を使うすべての受信機の位置が、衛星に向かう線に沿って300 mずれてしまいます。だから衛星の時計は、1日に何回も地上から修正されているのです。

航空機は2種類の高度を持っています。衛星による計算からは、基準となる楕円体からの幾何学的な高さがわかります。しかし航空交通のために発信される高度は気圧高度です。胴体にある穴で測った気圧を、国際標準大気を使って高さに換算したものです。国際標準大気では、海面で1013.25 hPa、15 度Cで、1キロメートル上がるごとに6.5 度下がると仮定しています。実際の気圧が標準と違うと、すべての航空機の気圧高度が同じだけずれます。これこそが間隔を保つのに必要なことです。フライトレベル350と360を示している2機は、天気がどうであっても1 000 ft離れているのです。位置メッセージは気圧高度を25フィート刻みで運び、速度メッセージは気圧高度と幾何学的高度の差を運びます。表計算ソフトがあれば、p = p0 (1 - 0.0065 h / 288.15)^5.255 を使って、11 000 mでは気圧が約227 hPa、つまり海面の4分の1より低いことを確かめてみましょう。旅客機が飛んでいる空気の中では、人は意識を保てません。

では、考え方をまるごと逆にしてみましょう。位置を含まずに1090 MHzで送信する航空機もあります。識別番号と高度だけでレーダーに答える古いトランスポンダや、衛星の電波が妨害されている航空機です。それでも受信機のネットワークは、マルチラテレーション(MLAT)という方法でそれらの位置を見つけられます。時計を合わせた4台の受信機が、同じ送信の到着時刻をそれぞれ記録したとします。受信機Aに受信機Bより1マイクロ秒早く届いたメッセージは、BよりAに300 m近い点から送られたことになり、そういう点をすべて集めると、AとBを焦点とする双曲面ができます。4台の受信機から独立した3組のペアを作ると3つの双曲面ができ、それらが交わるところに航空機がいます。これは衛星の問題で、わかっているものとわからないものを入れ替えたものです。衛星の場合は1台の受信機と位置のわかった4つの送信機、こちらは1つの送信機と位置のわかった4台の受信機です。どちらも測っているのは時間で、1マイクロ秒は300 mです。受信機は、航空機が使うのと同じ衛星を使って、時計をおよそ100ナノ秒の精度で合わせています。

これは音でも試せます。運動場の、位置を測っておいた3つの地点にストップウォッチを持った人が立ちます。隠れた4人目が1回手をたたき、それぞれが遅れを記録します。音の速さは343 m/sなので、0.1秒の差は34 mです。縮尺図の上で位置を試してみたり、双曲線をスケッチしたりすれば、手をたたいた人

が見つかります。次に、電波で200 kmの範囲で同じことをするには、ストップウォッチにどれだけの精度が必要か考えてみましょう。ネットワークに原子時計の時刻が必要な理由がわかるはずです。

レッスン3

メッセージ:112ビットと、誤りの見つけ方

トランスポンダは、ADS-BをMode Sの拡張スキッタとして送ります。8マイクロ秒のプリアンブルのあとに、1マイクロ秒に1ビットの速さで112ビットのデータが続きます。プリアンブルは0、1、3.5、4.5マイクロ秒の位置にある4つのパルスの決まったパターンで、考えたこともないかもしれない疑問に答えるのが役目です。雑音とほかの航空機の信号でいっぱいの通信路の中で、受信機はメッセージが始まったことや、各ビットがいつ始まるかをどうやって知るのでしょう。デコーダはこのパターンを休みなく探していて、見つけたとき、その両方がわかります。Wi-FiからQRコードまで、あなたが使っているデジタルの仕組みにはどれも、これに当たるものがあります。

送信機はオンかオフにしかなれません。では、どうやって1と0を送るのでしょう。ADS-Bはパルス位置変調を使います。1マイクロ秒の各ビットの枠を前半と後半に分け、前半にパルスがあって後半が無音なら1、無音のあとにパルスがあれば0です。1ビットにつき、パルスはいつもちょうど1つです。これが「パルスがあれば1、なければ0」より優れている理由を考えてみましょう。受信機はタイミングを見失いません。0が長く続いても大丈夫です。単純な方式では、0の連続は無音と区別できなくなってしまいます。また、パルスが決まったレベルを超えたかどうかではなく、前半と後半のどちらが強かったかで各ビットを決めるので、400 km先からの弱い信号も、真上からの強い信号と同じように確実に解読できます。

パルス位置変調で表した4ビット:1、0、1、1



1つの枠は1マイクロ秒です。前半にパルスがあれば1、後半にパルスがあれば0。

112ビットは次のように並んでいます。何も見ずに書けるようにしておきましょう。ビット1から5:ダウンリンクフォーマット。トランスポンダからのADS-Bなら17です。ビット6から8:能力コード。ビット9から32:24ビットのICAOアドレス。航空機の登録時に割り当てられる、その航空機の変わらない識別番号です。2^24 = 16 777 216個あり、国ごとにまとめて割り当てられています。ベルギーの範囲は16進数で448000から44FFFFです。ビット33から88:56ビットのメッセージフィールド。その最初の5ビットはタイプコードで、残りの51ビットに何が入っているかを示します。タイプコード1から4はコールサインを運び、6ビットの文字8つで、各文字は64種類の記号から選ばれます。タイプコード9から18は飛行中の位置を運びます。25フィート刻みの気圧高度が12ビット、偶数/奇数のフラグ、そして符号化された緯度と経度がそれぞれ17ビットです。タイプコード19は速度を運びます。東西方向と南北方向の対地速度の成分、昇降率、そして気圧高度と幾何学的高度の差です。ビット89から112:24ビットのパリティ。計算を確かめてみましょう。25 ft刻みで12ビットあれば102 400 ftまで表せます。17ビットを単純に緯度180度に使うと、1.4 kmまでしか区別できません。実際の位置がそれより正確なのは、コンパクト位置報告(CPR)のおかげです。17ビットは、ある区域の中での位置を数メートルの精度で表しますが、どの区域

かは表しません。そして航空機は、偶数と奇数の2つの区域の網目を交互に使います。両方を1つずつ受け取った受信機は区域をはっきり決められ、その後は1つのメッセージだけで追跡できます。同じビット数でより高い精度を、時間と引きかえに手に入れているのです。

DF 5 ビット ダウンリンクフォーマット	CA 3 ビット 能力	ICAOアドレス 24 ビット 航空機ごとの固有の識別番号	ME - 中身(ペイロード) 56 ビット 最初の5ビットのタイプコードによって、位置、高度、速度、コールサイン、または状態	PI 24 ビット 誤り検査(CRC)

このページの一番上にある本物のメッセージを分解してみましょう。8D4840D6202CC371C32CE0576098は16進数28桁、112ビットです。最初の2桁8Dは2進数で1000 1101です。最初の5ビット10001は17なので、これはトランスポンダからのADS-Bです。次の3ビット101から、能力は5です。次の6桁4840D6がICAOアドレスで、割り当て表によるとオランダのものです。次の2桁20は00100で始まり、これはタイプコード4、つまり識別メッセージです。続く6ビットの文字を解読すると、コールサインKLM1023が出てきます。最後の6桁576098がパリティです。表計算ソフトか数行のプログラムがあれば、解読を全部自分でできます。16進数の1行を見て「KLMの航空機が1023便だと伝えている」と言えるようになること、それがこのレッスンの目標です。

パリティについては、いちばんよく考える価値があります。混雑した空港の上空では、別々の航空機からの送信が受信機のところでしょっちゅう重なり、個々のパルスが雑音で失われます。デコーダが間違ったビットを組み立ててしまうことは、どうしても起こります。最後の24ビットは巡回冗長検査(CRC)です。88ビットのメッセージを1つの長い2進数とみなし、引き算が排他的論理和(XOR)になる計算方法で、決まった25ビットの生成多項式で割ります。その余りがCRCです。受信機は、解読したビットで同じ割り算をくり返します。ビットが1つ反転しても、2つ反転しても、24ビット以内の連続した誤りがあっても、余りが変わるので、そのメッセージは捨てられます。仕組みを見るために、まず8ビットのメッセージで4ビットのCRCを手で計算してみましょう。プログラムが書けるなら、本物のCRC-24を実装して、例のメッセージが検査を通ること、そしてどれか1ビットを反転させると通らなくなることを確かめてみましょう。これは現代のあらゆるシステムが行っている誤り検出そのものです。しかもここでは、誤りを見逃すと、管制官の画面に存在しない航空機が映ってしまうかもしれないのです。

レッスン4

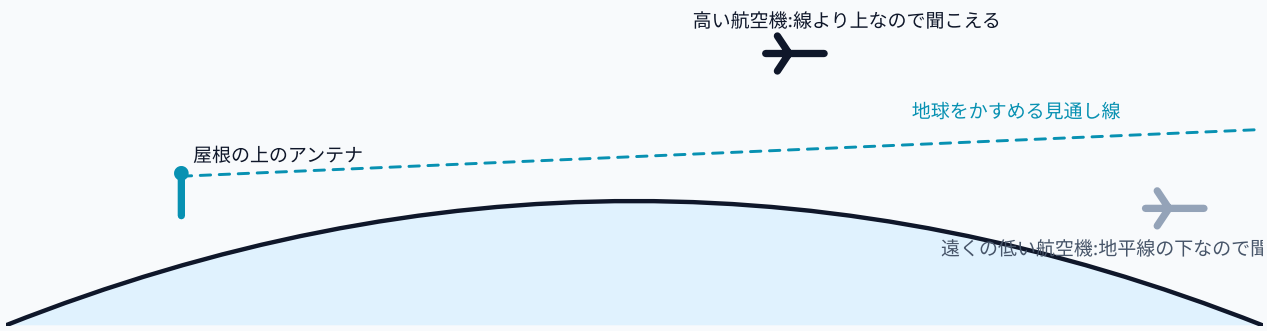
受信距離:地球の丸みと逆二乗の法則

受信機は、どれくらい遠くの航空機まで聞き取れるのでしょう。ここには2つの別々の限界があり、分けて考えることが大切です。1つ目は幾何学的な限界です。1090 MHzの電波は地球に沿って曲がらず、まっすぐ進みます。だから受信機に聞こえるのは、地平線より上にいる航空機、つまりアンテナまでの直線が地面にさえぎられない航空機だけです。地平線までの距離を導いてみましょう。半径Rの球の上、高さhにあるアンテナから見える地平線は、視線が球に接するところです。接線と2本の半径は接点で直角をつくるので、d^2 + R^2 = (R + h)^2 となり、d^2 = 2Rh + h^2 が得られます。hはRに比べてごく小さいので、d = sqrt(2Rh) です。R = 6 371 kmとし、hをメートルで表すと、d (km) = 3.57 sqrt(h) になります。大気の

屈折率は高さとともに小さくなるので、電波は少し下向きに曲がります。標準的な補正では、地球の半径を実際の4/3倍として扱い、3.57を4.12に置きかえます。高さh1のアンテナから高さh2の航空機までの見通し距離は、2つの地平線距離の合計です。

$$d\ (\mathrm{km}) = 4.12 \times (\ \sqrt{h1} + \sqrt{h2}\ ) \quad \text{with } h1,\ h2 \text{ in metres}$$

高さ20 mの屋根の上のアンテナと、高度11 000 mの航空機:4.12 x (4.47 + 104.9) = 451 km。同じアンテナで高度1 000 mの航空機:149 km。30 km離れた滑走路上の航空機:4.12 x (4.47 + 2) = 27 kmなので、聞こえません。



自分のアンテナの高さで、h2に対するdのグラフをかいてみましょう。曲線は最初は急で、だんだん平らになります。これを見ると、どの受信機の受信範囲の形も説明できます。巡航中の航空機なら400 km以上、進入中の航空機なら数十キロメートル、地上の航空機はすぐ隣の空港以外は何も聞こえません。受信機にとって高さがいちばん大切な性質である理由も、丘や建物、あるいは旋回して遠ざかる航空機自身の翼が、航跡を一瞬でとぎれさせる理由も、これでわかります。

2つ目の限界はエネルギーです。トランスポンダは数百ワットを、水平方向のどの向きにもほぼ同じように出しています。距離dのところでは、その電力が面積4 pi d^2の球面に広がるので、有効面積が決まったアンテナが受け取る電力は1 / d^2で小さくなります。これが逆二乗の法則です。暗記するのではなく、球の面積から導けるようにしておきましょう。距離が2倍なら電力は4分の1、10倍なら100分の1です。技術者はこの損失をデシベルで表します。10 dBは電力の10倍、3 dBは2倍です。デシベルを使うと、何桁にもわたるかけ算を足し算に変えられるからです。2つの単純なアンテナの間の自由空間伝搬損失は次のとおりです。

$$\text{path loss (dB)} = 20 \log_{10}(\ d \text{ in km}\ ) + 20 \log_{10}(\ f \text{ in MHz}\ ) + 32.44$$

400 km、1090 MHzでは:52.0 + 60.7 + 32.4 = 145 dB。250 Wの送信機は+54 dBmなので、受信電力は54 - 145 = -91 dBm、およそ8 x 10^-13 Wです。

この数字には立ち止まって考える価値があります。屋根の上の受信機は、航空機から出たときより10^14.5倍も弱い信号、100万分の1のさらに100万分の1ワットを検出しているのです。よいホビー用受信機は約-100 dBmまで解読できるので、400 kmでも9 dBの余裕があります。言いかえると、巡航中の旅客機では、エネルギーの限界と幾何学的な地平線がほぼ同じ場所にあり、それは意図して設計されたものです。トランスポンダの出力と受信機の規格は、航空機が地平線までは聞こえ、それより先にはあまり届かないように決められています。そうしておけば、隣の国の航空機の信号で通信路があふれることがないからです。

さらに2つのくわしい話です。ドップラー効果:250 m/sで近づいてくる航空機は、受信周波数をf v / c = 1.09 x 10^9 x 250 / 3 x 10^8 = 908 Hzずらします。これは100万分の1以下なので、受信機はまったく気づきません。同じ航空機の音と比べてみましょう。音ではv / cが250 / 343になり、通りすぎるときに音の高さが1オクターブ近く下がります。そして伝わる時間:400 kmを光の速さで進むと1.33ミリ秒かかるので、発信された位置は届いた時点ですでに1.33ミリ秒古く、その間に航空機は33 cm動いています。地図にとっては無視できますが、まさにこのマイクロ秒単位の差を使うマルチラテレーションにとっては決定的です。

レッスン5

アンテナと受信機:27センチメートルの波から地図の上の点まで

アンテナとは、通りすぎる電磁波によって交流電流が生まれる導体のことです。そして同じものに電流を流すと、電波を送り出します。受信アンテナと送信アンテナは、同じものを逆向きに使っているだけなのです。生まれる電流がいちばん大きくなるのは共振のときです。導体の長さが、導体に沿った電流の分布を電波の振動に合わせられる長さのとき、ちょうどよい長さの弦が特定の音で共鳴するように共振します。まっすぐな導体の基本の共振は半波長で、1090 MHzでは13.75 cmです。電流は中央でいちばん大きく、両端でゼロになります。航空機でもほとんどの受信機でも、実際に使われるADS-Bアンテナは1/4波長のモノポールです。導電性のグラウンドプレーンの上に立てた6.9 cmの垂直な素子で、グラウンドプレーンが素子を鏡のように映すので、素子とその像を合わせて半波長のダイポールになります。航空機では胴体がグラウンドプレーンです。市販の1090 MHzアンテナは、筒の中に同じ形を何段も重ねて隠しています。手作りのアンテナは数ミリの誤差で同調がずれ、空のほんの一部しか聞こえません。だからプロジェクトの受信機では、工場で調整されたアンテナを使います。

垂直のモノポールは地平線の方向にいちばん感度が高く、自分の軸の方向にはまったく感度がありません。3次元で見た感度は、真ん中の穴にアンテナを通したドーナツの形です。だからあなたの受信機は、300 km先の航空機は完璧に聞き取れるのに、真上を通る航空機は数秒間見失います。実際にそうなるところを観察できます。コリニアアンテナは共振する素子を何段も重ねたもので、ドーナツを平たくし、真上の穴を大きくするかわりに地平線方向の感度を上げます。これがアンテナの利得で、dBiで表します。利得は感度を配り直すことで生まれるのであって、感度を作り出すことは決してありません。そしてレッスン1で学んだとおり、電波は垂直偏波なので、アンテナは垂直にしなければなりません。

アンテナから地図の上の点までには、4つの段階があります。バンドパスフィルタは1090 MHzを通し、数百メガヘルツ離れたところにある、ずっと強い携帯電話の電波をはね返します。そうしないと、後ろにあるものがすべて飽和してしまいます。アンテナのところにある低雑音増幅器(LNA)は、ケーブルに入る前に信号を1000倍にします。1090 MHzではケーブルで10メートルごとに約3 dB、つまり信号の半分が失われます。ケーブルの後で増幅すると、ケーブルの雑音までいっしょに増幅してしまいます。ソフトウェア無線(SDR)は、もともとテレビチューナーとして売られていた20ユーロのUSB機器で、信号の周波数を下げ、1秒に200万回サンプリングして数値の流れにします。ここから先はプログラミングです。無料のソフトウェアがサンプルの中からプリアンブルを探し、1マイクロ秒の各枠の前半と後半のどちらにエネルギーが多いかを測り、112ビットを組み立て、CRCを計算し、合格すればフィールドを解読します。そしてトラッカーが偶数と奇数の位置フレームを組み合わせ、位置・速度・識別番号をICAOアドレスごとにまとめ、メッセージが届かなくなるまで各航空機の状態を保ちます。届かなくなるのは、たいてい航空機が地平線の下に沈んだからです。

この流れを、各段階での量といっしょに図にかいてみましょう。アンテナではナノボルト、増幅器の後ではマイクロボルト、無線機からは1秒に200万個のサンプル、デコーダからは1秒に数百のフレーム、トラッカーからは航空機1機につき1つの記録。地図の上の点は、1つ1つの輪がこのコースで学んだ考え方でできている鎖の、いちばん先にあるのです。共振、フィルタ、増幅、サンプリング、パターン照合、解読、誤り検査、集約。プロジェクトでは、この鎖を自分で作って、コースの内容を空と照らし合わせます。高度ごとの最大受信距離を測って地平線の式と比べる。アンテナを室内、窓ぎわ、屋根の上に置いたり、垂直と水平にしたりして比べる。1日分の交通を記録して、いちばん混む時間帯と、ふつうの巡航高度を見つける。生のメッセージを解読して、自分のコードでCRCを確かめる。そして、このシステムが投げかけるのに答えてはくれない問いを考えてみましょう。メッセージには署名がないのに、存在しない航空機を発信しようとする人をどうやって止めるのか。航空機は妨害されうる衛星に頼っているが、妨害されたとき管制官には何が見えるのか。そしてデータは航空機を特定し、航空機は人を特定しうる。では、誰が誰を追跡できるようにすべきなのか。

チャレンジ問題

どれもまず紙の上で解いてみましょう。答え合わせで答えと考え方が見られます。

1. **1. 1090 MHzの信号の波長はいくつですか。また、それに合う1/4波長アンテナの長さはいくつですか。**

2. **2. メッセージは音の何倍速いですか。30 km離れた航空機が両方を同時に出したとき、音が届くまでに航空機はどれだけ飛んでいますか。**

3. **3. 受信機の時計が2マイクロ秒ずれています。距離の誤差はいくつになりますか。また、衛星受信機に衛星が3機ではなく4機必要なのはなぜですか。**

4. **4. 24ビットのアドレスで何機の航空機を区別できますか。1マイクロ秒に1ビットで送る112ビットのメッセージはどれだけの時間がかかり、プリアンブルを含めた送信全体ではどれだけかかりますか。**

5. **5. メッセージ8D4840D6…のダウンリンクフォーマットと能力は何ですか。また、ICAOアドレスは何ですか。**

6. **6. 受信アンテナが高さ15 mにあります。高度9 000 mの航空機までと、高度300 mの航空機までの電波の地平線はそれぞれいくつですか。**

7. **7. 距離が2倍になると受信電力が4分の1になるのはなぜですか。200 kmでの伝搬損失はいくつで、400 kmでの145 dBと比べてどうですか。**

8. **8. アンテナを水平に寝かせたとき、また受信機を屋根から1階に移したとき、受信距離がどうなるか予想しましょう。**

次へ

作ってみよう

これらのレッスンの内容は、どれも窓ぎわから確かめられます。実践ワークショップでは、買い物リスト(およそ100から150ユーロ、またはすでに持っているRaspberry Pi)、選ぶべきアンテナと置き場所、Dataeroのフィーダーをインストールする3つのコマンド、そして本物の航空機を相手に式を確かめる測定(電波の地平線、逆二乗の法則、1日のリズム)を紹介しています。あなたの受信機が地図にデータを送るようになると、受信機が聞き取ったすべての航空機が、あなたの受信局の名前つきで、みんなの地図に描かれます。

実践ワークショップを開く https://radar.dataero.eu/ja/learning/workshop

解答

1. 1. 1090 MHzの信号の波長はいくつですか。また、それに合う1/4波長アンテナの長さはいくつですか。
   lambda = c / f = 3.00 x 10^8 / 1.09 x 10^9 = 0.275 m。1/4波長の素子は6.9 cmです。光の速さが決まっているので、周波数と波長は反比例の関係になります。
2. 2. メッセージは音の何倍速いですか。30 km離れた航空機が両方を同時に出したとき、音が届くまでに航空機はどれだけ飛んでいますか。
   3.00 x 10^8 / 343 = およそ875 000倍です。メッセージは100マイクロ秒で届き、音は87秒で届きます。その間に250 m/sの航空機は22 km飛びます。
3. 3. 受信機の時計が2マイクロ秒ずれています。距離の誤差はいくつになりますか。また、衛星受信機に衛星が3機ではなく4機必要なのはなぜですか。
   2 x 10^-6 s x 3 x 10^8 m/s = 600 m。3機の衛星でx、y、zが決まるのは時計が完璧な場合だけです。時計のずれが4つ目の未知数になるので、4機目の衛星が必要です。
4. 4. 24ビットのアドレスで何機の航空機を区別できますか。1マイクロ秒に1ビットで送る112ビットのメッセージはどれだけの時間がかかり、プリアンブルを含めた送信全体ではどれだけかかりますか。
   2^24 = 16 777 216。データは112マイクロ秒かかり、8マイクロ秒のプリアンブルを加えると120マイクロ秒です。
5. 5. メッセージ8D4840D6...のダウンリンクフォーマットと能力は何ですか。また、ICAOアドレスは何ですか。
   8D = 1000 1101。最初の5ビット10001 = 17:DF 17、Mode Sトランスポンダからの ADS-Bです。次の3ビット101 = 5:CA 5。ICAOアドレスは4840D6で、オランダに割り当てられています。
6. 6. 受信アンテナが高さ15 mにあります。高度9 000 mの航空機までと、高度300 mの航空機までの電波の地平線はそれぞれいくつですか。
   d = 4.12 x (sqrt(15) + sqrt(9000)) = 4.12 x (3.87 + 94.9) = 407 km。300 mの場合:4.12 x (3.87 + 17.3) = 87 km。
7. 7. 距離が2倍になると受信電力が4分の1になるのはなぜですか。200 kmでの伝搬損失はいくつで、400 kmでの145 dBと比べてどうですか。
   送信された電力は面積4 pi d^2の球面に広がり、距離が2倍になると面積は4倍になります。200 kmでは:20 log10(200) + 20 log10(1090) + 32.44 = 46.0 + 60.7 + 32.4 = 139 dBで、400 kmより6 dB(4倍)小さくなります。
8. 8. アンテナを水平に寝かせたとき、また受信機を屋根から1階に移したとき、受信距離がどうなるか予想しましょう。
   水平の場合:アンテナは垂直の電波に対して直交偏波になります。生まれる電流は導体に沿った電場の成分で決まるので、ほとんど何も聞こえません。1階の場合:地平線の項4.12 sqrt(h1)が小さくなり、建物が見通しをさえぎるので、受信距離は大きく落ちます。特に低い航空機でそうなります。