12歳から18歳 - 先生向け

空を解読しよう:1つの実在するシステムで学ぶ物理と情報

5つのレッスンと1つのプロジェクトで構成されています。各レッスンではADS-Bの一部分を取り上げ、その背後にある物理や情報技術を十分に掘り下げます。クラスがついて来られる範囲での式の導出、実際の数値を使った例題、考え方を目に見える形にする実演、そして生徒の直感が誤りやすい点です。年齢の低いグループ(12歳から14歳)は考え方と計算を追い、年齢の高いグループ(15歳から18歳)は導出を追ってプロジェクトを実施します。

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

目次

始める前に:1つの実在するシステムが5回の授業に値する理由
レッスン1 - 物理 波と電磁スペクトル:メッセージを運ぶもの
レッスン2 - 物理と数学 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、そしてネットワークは位置を言わない航空機をどう見つけるのか
レッスン3 - 情報 デジタルメッセージ:112ビット、その送り方、そして誤りの見つけ方
レッスン4 - 物理 伝搬と受信距離:地球の丸みと逆二乗の法則
レッスン5 - 物理と工学 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
プロジェクト - 2週間から4週間 受信機を作り、物理を空と照らし合わせよう
生徒用チャレンジ問題の解答
次へ プロジェクトを段階的に

始める前に:1つの実在するシステムが5回の授業に値する理由

12歳から18歳の間に教える物理の多くは、ばらばらに教えられています。こちらでは波の単元、あちらでは電磁スペクトルの単元、情報の授業ではデジタルデータの話題、地理では衛星への言及といった具合です。ADS-Bは、それらすべての要素が同時に欠かせない役割を果たしている1つの実働システムであり、しかもクラスは教科書1冊より安い受信機でその結果を観察できます。航空機は衛星からの電波の時間を測って自分の位置を求めます。これは三辺測量と光の速さです。その結果を巡回冗長検査つきの112ビットに符号化します。これは2進符号化と誤り検出です。それを1090 MHzのパルス位置変調の電波として送信します。これはスペクトル、周波数、波長です。電波は地球の丸みにさえぎられない直線に沿ってのみ受信機に届き、距離の二乗に反比例して弱くなって到着します。これは幾何学とエネルギーです。1/4波長に同調したアンテナがそれを電流に変えます。これは共振です。そして受信機のネットワークは、到着時刻の差から、位置を発信しない送信機さえ見つけられます。これは衛星の問題を裏返したものです。以下の各レッスンはこれらのうち1つを取り上げてそれ自体として掘り下げ、ADS-Bは飾りではなく、全体を貫く具体例として使います。

ホームページの基本コースは、システム全体を読み物の形で紹介しています。クラスにはレッスン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章を読ませてください。用語集は配布資料として役立ちます。このページは、先生がすでにそれを読んでいることを前提に、物理と指導に焦点を当て

ています。数値の約束は全体を通じて統一しています。c = 3.00 x 10^8 m/s、f = 1090 MHz、高さはメートル、距離はキロメートルで表し、例題で特に断らない限り、巡航中の航空機は高度11 000 m(フライトレベル360)、速度250 m/sとします。

直感について2つ注意があります。生徒は、電波は音の一種であり、「レーダー」や「衛星」が航空機を見ていると思い込んで授業に来ます。どちらも誤りで、どちらもレッスン1と2ではっきり扱い、そしてどちらもまた顔を出します。このコースは、後のレッスンごとにそれを正す新しい理由が得られるように作られています。また、式に慣れている生徒が、量の大きさには慣れていないこともよくあります。このコースでは毎回「それはどれくらいの大きさか」と問うことを重視しています。1マイクロ秒で300 m、145 dBの伝搬損失、2^24個のアドレスといった数値こそが、物理を実感させてくれるからです。

レッスン1 - 物理

波と電磁スペクトル:メッセージを運ぶもの

コース全体の土台となる事実から始めます。航空機の無線メッセージと光線は、同じ物理現象です。どちらも電磁波であり、振動する電場と磁場が、媒質なしに空間を伝わります。その速さcは真空中ではどの周波数でも同じで、空気中でもほぼ同じです。299 792 458 m/sで、クラスでは3.00 x 10^8 m/sとしてかまいません。電波と可視光、可視光とX線を区別する量は、振動の周波数fだけです。網膜は約4 x 10^14 Hzから8 x 10^14 Hzの周波数に反応し、私たちはそれを赤から紫として感じます。ADS-Bは1.09 x 10^9 Hzで送信され、およそ50万分の1の低さです。波そのものの種類は何も変わりません。選り好みしているのは私たちの目だけです。

波の式は、示すのではなくクラスといっしょに導いてください。速さcで進み、1秒にf回振動する波は、1秒間に距離cだけ進み、f回の完全な振動をつくります。したがって1回の振動はc / fの長さを占めます。その長さが波長lambdaであり、c = f x lambdaとなります。ADS-Bに当てはめると、lambda = 3.00 x 10^8 / 1.09 x 10^9 = 0.275 mです。航空機と受信機の間のメッセージは、山と山の間隔が27.5 cmです。生徒自身が対数の軸で描いたスペクトルの上に、これを置かせてください。100 MHzで3 mのFM放送、1 090 MHzで27.5 cmのADS-B、1 800 MHzで17 cmの携帯電話、2 450 MHzで12 cmのWi-Fiと電子レンジ、赤外線、5.6 x 10^14 Hzで540 nmの可視光、そしてX線まで。航空機の電波を携帯電話と電子レンジの間に置く作業は、どんな表よりも価値があります。これらがご近所どうしだということが伝わるからです。

次に、音との混同に正面から向き合います。この混同はだれにでもあり、対比することで両方の現象を教えられるからです。音は媒質の中を伝わる縦波の圧力波で、その速さは媒質の性質です。20度の空気中で343 m/s、水中で約1 500 m/s、真空中ではゼロです。電波は媒質をまったく必要としない横波の電磁波で、真空中ではcで進み、空気中ではほんのわずかに遅くなります。その差を数値にしましょう。3.00 x 10^8を343で割ると約875 000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、音は87秒で届きます。音が届くころには、航空機は22 km飛んでいます。実演には教室でのロープと、運動場の端から端への懐中電灯を使います。ロープの波には明らかにロープが必要で、ロープが決める速さで進みます。懐中電灯の光は、だれにも測れないほどの遅れで向こう端に届きます。ロープが光と共有しているもの(波であること、波長、周波数、決まった速さ、したがってfとlambdaの反比例の関係)と、共有していないもの(媒質、秒速数メートルという速さ)を、はっきり書き出してください。

最後に偏波を扱います。見せるのは簡単で、レッスン5で効いてきます。電磁波の電場は、進行方向に垂直な決まった向きに振動しています。航空機のトランスポンダのアンテナは垂直なので、ADS-Bの電波は垂直偏波です。受信アンテナも垂直でなければならず、水平にするとほとんど何も受信できません。縦に

揺らしたロープの波は段ボール箱の縦のすき間を通り、横のすき間では止められます。2枚の偏光フィルム(安価な3Dメガネから取れます)を窓に向けて直交させると、光でも同じことが見られます。受信アンテナを横に寝かせたら受信がどうなるか、クラスに予想させてください。その予想はプロジェクトで確かめます。

出題用の例題
アメリカで軽飛行機が使う2つ目のADS-Bシステムは、978 MHzで送信します。その波長はいくつで、それに合う1/4波長アンテナの長さはいくつでしょうか。(0.307 m、7.7 cm。)これが解ける生徒は、レッスン1を身につけています。

レッスン2 - 物理と数学

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、そしてネットワークは位置を言わない航空機をどう見つけるのか

航空機が自分の位置について発信するものは、すべて衛星測位から来ています。そして衛星測位は、根本的には時間の測定です。高度約20 200 kmを回る各GNSS衛星は原子時計を積み、自分の位置と送信の正確な時刻を伝える信号を出しています。受信機は到着の時刻を記録します。その差にcをかけたものがその衛星までの距離であり、その距離が1つあれば、受信機は衛星を中心とするその半径の球面の上に置かれます。数の関係はクラスに導かせてください。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点は地表から遠く離れているので捨てられます。つまり、受信機の時計が完璧であれば衛星は3機で足ります。実際にはまったくそうではなく、水晶発振器は必要とされるナノ秒よりはるかに大きくずれます。この分野の見事な核心となる解決策は、受信機の時計の誤差を4つ目の未知数として扱い、4機目の衛星を使うことです。4つの未知数(x、y、zと時計のずれ)についての4つの式を、絶えず解き続けます。したがってGNSS受信機には4機の衛星が見えている必要があり、そのおまけとして数十ナノ秒以内の精度で時刻を保ちます。レッスン5のネットワークの受信機が、時計のために航空機と同じ衛星を使うのはこのためです。

量の大きさを黒板に書き、何度もそこに立ち返ってください。光は1ナノ秒に0.300 m、1マイクロ秒に300 m進みます。1マイクロ秒の時間の誤差は300 mの距離の誤差です。現代の受信機の数メートルという精度は、10ナノ秒程度の時間精度に相当します。真上の衛星からの伝搬時間は20 200 km / 3.00 x 10^5 km/s = 0.0673秒、地平線近くの衛星からは約0.086秒です。つまり受信機は、数ミリ秒の差を、その1億分の1の精度で測っていることになります。衛星の時計が1マイクロ秒進んでいたら何が起こるか、クラスに尋ねてください。それを使うすべての受信機が、衛星に向かう線に沿って約300 m押しやられることがわかるはずです。衛星の時計が1日に何回も地上から修正されているのはこのためです。

2つの高度を区別しておきます。メッセージには両方が入っていて、生徒は必ず質問するからです。衛星による解からは、地球の基準楕円体からの幾何学的な高さが得られます。それでも航空機が報告するのは気圧高度です。胴体の外の静圧を国際標準大気によって高さに換算したもので、国際標準大気は海面で1013.25 hPa、15度、1キロメートルごとに6.5度の低下を仮定しています。実際の気圧が標準と異なる日には、すべての航空機の気圧高度が同じだけずれます。これこそ間隔の確保に必要なことです。フライトレベル350と360を示す2機は、天候にかかわらず1 000 ft離れています。ADS-Bの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ぶので、受信機は両方を復元できます。年齢の高いグループには、国際標準大気の関係式p = p0 (1 - 0.0065 h / 288.15)^5.255がよい表計算の練習になります。これを逆に解いてpからhを求め、11 000 mが約227 hPa、海面気圧の5分の1に相当することを確かめさせてください。

ここで問題を裏返します。衛星による位置を含まずに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応答する古いトランスポンダや、GNSS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、その位置を求められます。時計を同期させた4台の受信機が、同じ送信の到着時刻を記録したとします。送信機は未知で、受信機は既知です。これは、既知と未知の役割を入れ替えたGNSSの問題です。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近い点から送られており、そのような点の軌跡はAとBを焦点とする双曲面です。4台の受信機から独立した3組のペアを作ると3つの双曲面が得られ、その交点が航空機です。これがマルチラテレーション(MLAT)で、受信機の時計が約100ナノ秒の精度で一致している必要があり、その精度は衛星から得ています。クラスでは、運動場での演習で2次元に落とし込みます。位置を測った地点にストップウォッチを持った生徒が3人立ち、どこかに隠れた4人目が手をたたきます。3人は反応時間を補正した遅れを記録し、クラスは343 m/sを使って双曲線を描き(より簡単には縮尺図の上で位置を試して)、手をたたいた人を見つけます。そのうえで、電波で200 kmの範囲で同じことをするには時間の精度がどれだけ必要かを尋ね、ストップウォッチと原子時計の差を実感させてください。

出題用の例題
60 km離れた2台の受信機が、あるメッセージを50マイクロ秒の差で記録しました。航空機は1台目の受信機にどれだけ近かったでしょうか。(15 km。)時計がおたがいに1マイクロ秒ずれていたら、答えにどれだけの誤差が生じるでしょうか。(300 m。)2つ目の答えが距離によらない理由を説明できる生徒は、マルチラテレーションに何が求められるかを理解しています。

レッスン3 - 情報

デジタルメッセージ:112ビット、その送り方、そして誤りの見つけ方

航空機のトランスポンダは、ADS-BのデータをMode Sの拡張スキッタ(extended squitter)として送ります。8マイクロ秒のプリアンブルに続いて、ちょうど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。授業はプリアンブルから始めてください。生徒がまだ思いついていない疑問に答えるからです。通信路が雑音とほかの航空機の信号でいっぱいのとき、受信機はどうやってメッセージが始まったことを知るのでしょうか。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す。デコーダは常にこのパターンを探しており、見つけると、メッセージが続くことと、各ビットの枠が始まる正確な時刻の両方がわかります。Wi-FiからQRコードまで、生徒が出会ってきたあらゆるデジタルの仕組みにはこれに当たるものがあり、ここでそれを伝えるとよいでしょう。

次は変調です。無線機はオンかオフにしかなれません。では1や0をどう送るのでしょうか。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。黒板にいくつかのビットをパルスとして描き、クラスに読ませてください。そして、「パルスがあれば1、なければ0」という素朴な方式よりこれが優れている理由を尋ねます。少し促せば2つの理由が出てきます。1ビットにつきパルスが必ず1つあるので、0が続いても受信機はタイミングを固定したままでいられます。また、パルスがある絶対的なしきい値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られるので、解読が信号の強さに左右されません。素朴な方式では0の長い連続は無音と区別できませんが、PPMでは後半のパルスが規則正しく刻まれる太鼓の音のようになります。

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。

続いて112ビットの配置です。授業の終わりまでに、クラスが何も見ずに再現できるようにします。ビット1から5はダウンリンクフォーマットで、トランスポンダからのADS-Bなら17です。ビット6から8は能力コードです。ビット9から32は24ビットのICAOアドレスで、航空機の変わらない識別番号です。ビット33から88は56ビットのメッセージフィールドで、その最初の5ビットであるタイプコードが、残りの51ビットの中身を示します。識別メッセージ(タイプコード1から4)は8文字のコールサインを6ビットの文字8つとして運びます。飛行中の位置(9から18)は、気圧高度12ビット、偶数フレームか奇数フレームかを示すフラグ、そして符号化された緯度と経度をそれぞれ17ビット運びます。速度メッセージ(19)は対地速度の東西方向と南北方向の成分、昇降率、気圧高度と幾何学的高度の差を運びます。ビット89から112は24ビットのパリティです。計算を出題してください。24ビットのアドレスで2^24 = 16 777 216機を表せます。6ビットの文字8つはそれぞれ64種類の記号を使え、英字、数字、空白に十分です。25フィート刻みの12ビットの高度は102 400フィートまでを表せます。そして17ビットの緯度を単純に180度に使うと1.4 kmまでしか区別できず、コンパクト位置報告(CPR)が答える問いが生まれます。CPRは1段落で説明してください。17ビットは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。航空機は偶数と奇数の2つの区域の網目を交互に使い、両方を1つずつ持つ受信機は区域を一意に決められ、その後は単独のメッセージで追跡できます。時間を使うことで同じビット数からより高い精度を得る、見事な例です。

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)

クラスに本物のメッセージを渡し、分解させてください。16進数の文字列8D4840D6202CC371C32CE0576098は16進数28桁、112ビットです。最初の2桁8Dを2進数に変換すると10001 101となり、DF = 17、CA = 5です。次の6桁4840D6がICAOアドレスで、割り当て表ではオランダに割り当てられています。続く20 …は00100で始まり、タイプコード4、つまり識別メッセージで、後に続く6ビットの文字を解読するとコールサインKLM1023が得られます。最後の6桁576098がパリティです。表計算ソフトか数行のPythonがあれば、クラスは1回の授業で解読全体を行えます。16進数の文字列を見て「これはKLMの航空機が便名を伝えている」と言えるようになること、それが目指すべき成果です。

> 8D **4840D6** 202CC371C32CE0 576098
>
> 8D:ダウンリンクフォーマット17、能力5。4840D6:ICAOアドレス、オランダに割り当て。20...:タイプコード4、識別、コールサインKLM1023。576098:24ビットのパリティ。

最後にパリティを扱います。いちばん掘り下げる価値のある情報技術の考え方だからです。混雑した空港の上空では、別々の航空機からのメッセージが受信機のところで絶えず重なり、パルスは雑音でも失われます。デコーダが誤ったビットを組み立ててしまうことは避けられません。最後の24ビットのフィールドは巡回冗長検査(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)になる特別な計算方法で、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て比較します。1ビットでも、2ビットでも、24ビット以内の連続した誤りでも、壊れていれば余りが変わるので、そのメッセージは捨てられます。考え方は小さな規模で実演してください。8ビットのメッセージに対する4ビットのCRCを手で計算するか、より簡単な類例としてバーコードのチェックデジットを使います。そのうえで年齢の高いグループには、本物のCRC-24を数行のコードで実装させ、例のメッセージのパリティが正しく出ること、そして1ビットを反転させると検査に通らなくなることを確かめさせてください。これは現代のあらゆるシステムが行っている誤り検出であり、しかも誤りを見逃すと管制官の画面に存在しない航空機が映りかねないという状況の中で出会うものです。

出題用の例題
1回の送信全体はどれだけの時間続くでしょうか。また、トランスポンダが1秒に4.5回の拡張スキッタを送るとき、ADS-Bを送信している時間の割合はいくつでしょうか。(120マイクロ秒、1秒あたり540マイクロ秒で0.054パーセント。)そこで送信されるほかのすべてを無視すると、原理的には何機の航空機がこの通信路を共有でき、それを超えると通信路が常にふさがるでしょうか。(約1 850機。最も混雑した空域での輻輳が現実の工学的課題であるのはこのためです。)

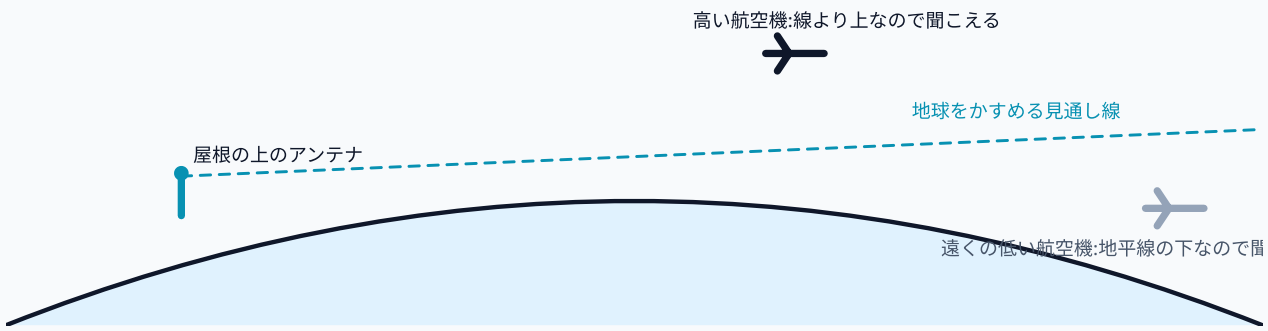
レッスン4 - 物理

伝搬と受信距離: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か。この問いには幾何学的な答えとエネルギー的な答えという、互いに独立した2つの答えがあります。このレッスンの目的は、両方を導き、設計者が両者を一致させるように工夫していたことを発見することです。まず幾何学から。1090 MHzの電波は、地球を回り込むほどには回折しません。光のようにふるまい、直線に沿って進みます。したがって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を通らない航空機だけです。地平線までの距離をクラスといっしょに導いてください。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、接点への半径、アンテナへの半径は接点で直角をつくるので、三平方の定理からd^2 + R^2 = (R + h)^2、すなわちd^2 = 2Rh + h^2となります。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、キロメートル単位のdはsqrt(2 x 6371 x h / 1000) = 3.57 sqrt(h)です。大気の密度、したがって屈折率は高さとともに小さくなるので、電波の進路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倍とみなし、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。

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

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:4.12 x (4.47 + 31.6) = 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。



自分たちの学校のアンテナの高さで、h2に対するdのグラフをクラスに描かせてください。最初は急で次第に平らになるこの曲線が、どの受信機の受信範囲の形も説明します。巡航中の航空機なら半径400 km以上の円、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。また、受信機にとって高さがほかのどの性質よりも重要である理由や、自分と空港の間にある丘、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説明できます。小学校向けコースの運動場での実演、しゃがむよりベンチに立ったほうが遠くまで見えるというものは、そのあとに導出を続けるなら、この年齢層にとっても子どもっぽすぎることはありません。大切なのは、今度はその理由がわかるという点です。

次にエネルギーです。トランスポンダは数百ワットのピーク電力を、水平方向のどの向きにもほぼ同じように放射します。距離dのところでは、その電力は面積4 pi d^2の球面に広がっているので、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、クラスには暗記させるのではなく、球の面積から導かせてください。距離が2倍なら電力は4分の1、10倍なら100分の1です。無線技術者は、等方性の送信機と等方性の受信機の間の損失をデシベルで表します。標準的な式は次のとおりで、年齢の高いグループはそのまま受け入れるか、アンテナの有効面積lambda^2 / 4 piから導くことができます。

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

400 km、1090 MHzでは:20 x 2.60 + 20 x 3.04 + 32.44 = 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、約8 x 10^-13 W、つまり100万分の1のさらに100万分の1ワットです。

クラスがデシベルに初めて触れるなら、数分かけて説明してください。デシベルは14桁にわたるかけ算を足し算に変えてくれますし、この数値そのものが教訓的だからです。屋根の上の受信機は、航空機を出たときより10^14.5倍弱い信号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でも約9 dBの余裕があります。つまり、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るということです。これは偶然ではありません。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、それよりあまり先には届かないように定められており、そのおかげで通信路が隣の国からの送信であふれずにすむのです。

年齢の高いグループのために、くわしい話を2つ。1つ目はドップラー効果です。250 m/sで近づく航空機は、受信周波数をf x v / c = 1.09 x 10^9 x 250 / 3 x 10^8 = 908 Hzずらします。これは搬送波の100万分の1未満で、受信機はまったく気づきません。航空機の音で聞こえるドップラー効果と対比してください。音ではv / cが250 / 343となり、通りすぎるときに音の高さが1オクターブ近く変わります。2つ目は信号の伝搬時間です。400 kmを光の速さで進むと1.33ミリ秒かかるので、メッセージの中の位置はすでに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レッスン2のマルチラテレーションにとっては決定的です。

出題用の例題
高さ10 mのマストの上の受信機が、高度11 000 mの巡航中の航空機は受信できるのに、130 km離れた高度600 mの軽飛行機は受信できません。軽飛行機は地平線の下にいるのでしょうか。(地平線:4.12 x (3.16 + 24.5) = 114 kmなので、そのとおりです。)それを受信するには、受信機はどれだけの高さにあればよいでしょうか。(4.12 x (sqrt(h1) + 24.5) = 130が必要なので、sqrt(h1) = 7.05、h1 = 50 m。)

レッスン5 - 物理と工学

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誘導される導体です。受信アンテナと送信アンテナは同じ装置を逆向きに使ったものであり、この相反性はクラスにはっきり伝えるべきです。誘導される電流は、導体が共振するときに最大になります。つまり、導体に沿った電流の分布が電波の振動に合うような長さのときで、ちょうどよい長さの弦が特定の音で共鳴したり、ぶらんこが特定のリズムで押すと大きく揺れたりするのとまったく同じです。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。電流は中央で最大になり、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電気的に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、感度を地平線方向に集中させています。授業で缶のふたに6.9 cmの棒を立てて作った模型は、形と長さを示し、27.5 cmの波と定規で比べられます。ただし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。数ミリの誤差で手作りのアンテナは同調がずれ、空のほんの一部しか聞こえなくなるからです。

放射パターンを掘り下げてください。クラスが観察できることを予言してくれるからです。垂直モノポールは地平線方向に最も強く放射・受信し、自分の軸の方向にはまったく放射・受信しません。その感度を3次元で描くと、穴にアンテナを通したドーナツの形になります。そのため受信機は、ふつう300 km先の航空機は完璧に受信するのに、真上を通る航空機は数秒間見失います。クラスは自分たちの受信機でそれが起こるのを観察できます。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、ドーナツをさらに平たくし、遠くの航空機がいる地平線方向の感度を上げるかわりに、真上の穴を大きくします。これがアンテナの利得で、dBiで表され、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。レッスン1の偏波は、ここでプロジェクトで確かめる実際的な結果につながります。アンテナは垂直でなければなりません。

アンテナとコンピュータの間には3つの段階があり、それぞれが小さな授業になります。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、はるかに強い携帯電話の送信をはね返します。そうしないと増幅器が飽和してしまいます。低雑音増幅器(LNA)は受信機側ではなくアンテナ側に

置き、信号がケーブルに入る前に1000倍に増幅します。順序が重要です。1090 MHzの同軸ケーブルは10メートルごとに信号のおよそ半分、3 dBを失うので、損失の後で増幅すると、信号といっしょにケーブルの雑音まで増幅してしまうからです。次にソフトウェア無線(SDR)です。もともとテレビチューナーとして作られた20ユーロのUSB機器で、信号をベースバンドまで周波数変換し、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、無線の問題はプログラミングの問題になります。無料のソフトウェアがサンプルの流れからプリアンブルのパターンを探し、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持します。

この流れは、生徒自身が描く図としてクラスに与え、各段階での量を書き込ませてください。アンテナではナノボルトの交流電流、増幅器の後ではマイクロボルト、SDRからは1秒に200万個の8ビットの数値、デコーダからは112ビットのフレームがおそらく1秒に数百、トラッカーからは航空機1機につき1つの記録。伝えるべき要点は、地図の上の点が、1つ1つの輪が生徒がいまや理解している考え方でできている鎖の、いちばん先にあるということです。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、集約です。

出題用の例題
1090 MHzで10 mあたり3 dBを失うケーブルがあります。20 mの配線では信号のどれだけの割合が失われるでしょうか。(6 dB、4分の3。)受信機の限界が-100 dBmで、400 km先の航空機からのアンテナでの信号が-91 dBmのとき、増幅器なしで信号はケーブルを通り抜けられるでしょうか。(ぎりぎりです:-97 dBm。コネクタにかかる雨やより長い配線など、少しでも損失が増えれば、地平線上の航空機は消えてしまいます。増幅器をアンテナ側に置くのはこのためです。)

プロジェクト - 2週間から4週間

受信機を作り、物理を空と照らし合わせよう

プロジェクトは、5つのレッスンを測定に変えます。必要な機材は、USBのソフトウェア無線ドングル(約25ユーロ)、工場で調整された1090 MHzアンテナ(50から70ユーロ)、数メートルの同軸ケーブル、そして無料のデコーダ(dump1090とその派生ソフトが標準です)を動かすノートパソコンかRaspberry Piです。インストールは午後半日で終わり、ソフトウェアは数分のうちに、航空機のICAOアドレス、コールサイン、位置、高度、速度の表と地図を表示します。プロジェクトはすべて受信のみで、何も送信しません。航空用の周波数で送信することは違法であり危険でもあることを、クラスに理解させてください。屋上に出るには学校の通常の許可が必要です。主な航空交通の流れに面した上の階の窓から始めても十分です。このサイトの「フィーダーになる」ページでは同じインストールを段階を追って説明しており、学校の受信機からライブマップにデータを送れるようになります。

最初の調査は電波の地平線です。デコーダは各航空機について、最後に受信されたときの距離と高度を報告します。1日かけて、いくつかの高度帯ごとに航空機が受信された最大距離を集め、高度に対する距離をグラフにします。生徒はレッスン4の式とアンテナの高さを知っているので、データを見る前に曲線を予想し、それから比べるようにします。高い航空機ではたいてい一致がよく、低い航空機では悪くなります。その理由(建物、地形、アンテナの真上の穴、航空機自身による遮蔽)についての議論は、教科書では得られない、理論と測定の対決そのものです。ソフトウェアが描く、各方向で受信された最も遠い航空機の地図には、地域全体の地形が受信範囲の影として表れます。

2つ目はアンテナです。アンテナを室内、窓ぎわ、屋根の上に置いた場合、垂直と水平に寝かせた場合、金属面の上に立てた場合と金属から離して持った場合で、メッセージの受信数と最大距離を比べます。どの比較もレッスン1と5の特定の主張を確かめるもので、どの結果も先に予想させてください。最も印象的なのは偏波の実験です。横に寝かせると、アンテナは航空機の大部分を失います。

3つ目はデータです。1日分の交通を記録し、それに問いを投げかけます。いちばん混む時間帯、巡航高度の分布(生徒はばらつきを予想しますが、ほとんどの旅客機が10 000 mから12 000 mの間にいることを発見します)、最寄りの空港から出発する航空機の上昇率、最も頻繁に通過する航空機の国(ICAOアドレスの割り当てから)などです。年齢の高いグループは、ソフトウェアが記録する16進数から生のメッセージを自分で解読し、自分のコードでCRCを確かめられます。30キロメートル以上離れた提携校に2台目の受信機があり、両方がGNSSのタイムスタンプつきで出力できるなら、両方が受信できる航空機について2次元のマルチラテレーションを試み、航空機が発信した位置と比べることもできます。これはコースで最も野心的な成果であり、実現可能なものです。

最後は、このシステムが投げかけるのに答えてはくれない問いで締めくくります。メッセージには署名がないので、送信機は存在しない航空機を発信できてしまいます。何がシステムを守っているのでしょうか。また、署名つきの仕組みにするとどんな代償があるでしょうか。航空機は妨害されうる衛星に頼っています。妨害されたとき、管制官の画面はどうなるでしょうか。データは航空機を特定し、航空機は人を特定しえます。誰が誰を追跡できるようにすべきでしょうか。受信機を作り上げたクラスには、これらの問いを考える資格があり、最後の小論文や討論の題材としてふさわしいものです。

生徒用チャレンジ問題の解答

生徒用のページには、各レッスンに1問か2問、合計8問のチャレンジ問題があり、宿題やコース終了時のテストとして使えます。満点の解答に含まれるべき考え方とともに、解答を示します。

1. 1090 MHzでの波長:lambda = c / f = 3.00 x 10^8 / 1.09 x 10^9 = 0.275 m。1/4波長の素子:6.9 cm。考え方:c = f x lambdaで、光の速さが一定であるため反比例の関係になります。
2. 光は音より3.00 x 10^8 / 343、約875 000倍速い。30 kmでは、メッセージは100マイクロ秒、音は87秒かかり、その間に250 m/sの航空機は22 km進みます。
3. 2マイクロ秒の時計の誤差は2 x 10^-6 x 3 x 10^8 = 600 mの距離の誤差になります。衛星が4機必要なのは、受信機の時計のずれがx、y、zと並ぶ4つ目の未知数だからです。
4. 2^24 = 16 777 216個のアドレス。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112マイクロ秒続き、プリアンブルを含めると120マイクロ秒です。
5. 8D4840D6...では、8Dは10001101です。最初の5ビット10001は17なので、DF = 17、Mode Sトランスポンダからの ADS-Bメッセージです。次の3ビット101からCA = 5です。4840D6がICAOアドレスです。
6. 高さ15 mのアンテナから高度9 000 mの航空機までの電波の地平線:4.12 x (3.87 + 94.9) = 407 km。高度300 mの航空機の場合:4.12 x (3.87 + 17.3) = 87 km。
7. 距離が2倍になると受信電力が4分の1になるのは、同じ送信電力が4倍の面積の球面に広がるからです。200 km、1090 MHzでの伝搬損失:20 x 2.30 + 60.7 + 32.4 = 139 dBで、400 kmより6 dB小さく、4倍の比と一致します。

8. 水平に寝かせたアンテナは垂直偏波の電波に対して直交偏波となり、ほとんど受信しません。誘導される電流は導体に沿った電場の成分で決まるからです。1階の受信機の受信距離が短くなるのは、地平線距離4.12 x sqrt(h1)が小さくなり、さらに建物が見通しをさえぎるからです。

次へ

プロジェクトを段階的に

レッスン6のプロジェクトは受信機があることを前提にしていましたが、実践ワークショップではそれを作ります。Raspberry Piを一度も使ったことがない人向けに書かれています。価格つきの買い物リスト、選ぶべきアンテナ、その設置場所とケーブル損失、Piの準備、Dataeroのフィーダーをインストールする3つのコマンド、受信局の登録、ゲインの調整、そして物理を空と照らし合わせる、レッスンごとに1つずつ、合計5つの測定です。Dataeroにデータを送る受信局があれば、クラスはダッシュボード、受信範囲の地図、1年分の履歴を使って学習できます。

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