

小・中型鳥類に搭載する測位システムの基礎研究

代表研究者 中島 功 東海大学 医学部 教授
共同研究者 北野 利彦 東海大学 医学部 研究員

1 目的

ARGOS や GPS が搭載できない小・中型鳥類の時刻・位置を航空機から発せられる ADS-B(ADS-B:Automatic Dependent Surveillance Broadcast)で補正・測位する基礎研究を行う。鳥体重の 4%が鳥のペイロードと言われており、近い将来、重量 100g のシロチドリに 4g の ADS-B 受信器を搭載し、位置誤差 $\pm 20\text{m}$ を最終目標としている。

2 背景

2-1 ARGOS システム

大型の渡り鳥では、NOAA 衛星データ収集中継器 ARGOS システムで、地理的な渡りが把握されてきている。これは 401MHz・ARGOS 発信機を鳥の背部に取り付け、衛星側で受信されるドップラーシフトを最小二乗法を用いて発信位置を算出するが、これは太陽電池でエネルギーを得る昼間に限られ、この時間帯は電離層によるファラデー回転の影響が大きく、位置精度は $\pm 20\text{km}$ と揺らいでいる。加えて機材の重量が 80g-20g と重く、一次電池の寿命は数ヶ月、また太陽電池を搭載しても週に一度ほどの通信しか成り立たない。NOAA 衛星への自由空間伝搬は仰角 30 度では 1840km、400bps のデータ uplink には、ドップラーシフトの位置演算では所要 $C/N_0=52\text{dBHz}$ 以上で、このため鳥の RF 出力 200mW 以上と大きい。最近 GPS+ARGOS が搭載されている機材もあるが、大型の鳥(放鳥トキなど)に限られている。

意義：航空機(ADS-B)高度 10km、NOAA 衛星 840km、GPS 衛星 20200km であり、-7dBi の ADS-B アンテナ端子の受信電力は GPS に比して 80dB 以上も高い(GPS cold start-146 dBm)。受信電力で 80dB は天と地の差である。日照時間によるおおまかな測位を行いながら、週に一度でも大圏コースを飛ぶ航空機からの ADS-B を捕えられれば、正確な時刻と位置の補正が鳥に搭載した CPU で行える。このシステムは GPS を負荷できない小型の鳥類の追跡に役立つ。

NOAA (ARGOS システム) 衛星は、元来洋上のブイからのデータ収集を目的に開発されたもので、CASPAR-SARSAT の基本となっている。60 秒ごとの BPSK 変調による ID アップリンクと衛星上での 3 回以上のドップラーシフト値から最小二乗法により測位する。本システムはこれまで多くの鳥類渡り調査では利用されている。しかし、衛星への自由空間伝搬は仰角 30 度で 1840km であり、400bps のデータ uplink には、ドップラーシフトの位置算出を含めると衛星上で $C/N_0=52\text{dBHz}$ 以上で、400bps の復調に比して測位の精度向上のため 18dB を上乗せした所要 C/N_0 を衛星上で要求している。18dB は通信にとって極めて大きな値である。この 18dB は鳥の負担であり、このため鳥が背負う地球局端末出力を 200mW (尖頭値)としなければならない。大型の鳥ですら ARGOS システムのスループットは、1 週間で 1, 2 度であり、また付加できるデータが 32bits と限られている。コストは送信機が 30 万円、毎月の通信費が数万円を要するので、多くの渡り鳥に装着するには相当な経費を要するので、山階鳥類研究所では毎年 20 羽程度しかモタできない。

2-2 鳥インフルエンザウイルス

鳥インフルエンザは、太古から鳥、動物、人と感染し、時として広範に伝播し猛威を振るって来た。鳥インフルエンザの遺伝子は、突然変異のスピードが速く、抗原に対する抗体や有効なワクチンが敏速に対応できないという課題がある。WHO 本部、2008 年 6 月の発表では SARS の死亡率が感染者の 4%であったのに対して、鳥インフルエンザ(H5N1)のこれまでの死亡率は 60%で、将来、パンデミックになる可能性が否定できない。この対策は予防が唯一の手段であり、キャリア鳥の疫学的な監視が不可欠であるにも係わらず、リアルタイムで監視する国際的なシステムはいまだ確立されていない。これまで鳥の渡りは、首輪、脚環に ID (標識番号)を添付することにより、鳥類の研究者、愛鳥家により離散的な情報として得られてきた。脚環の場合は、カスミ網で捕

らえるか、落鳥しないと読み取る事しかできなかった。もしデータを持ちかえる近距離でデータが落とすことができれば、夏季の繁殖場所、鳥相（遭遇する鳥の関係）が把握できるので、鳥インフルエンザの予防に役立てられる。すでに我々は首輪搭載用 2.4GHz パケット基板を開発しており、データ download に使える。夏季の繁殖地での位置を記録し、持ち帰り、データを回収（カスミ網で確保、2.4GHz パケット）できれば、適応となる鳥類は飛躍的に多くなり、鳥インフルエンザの予防が一步前進する。近い将来、皮下埋め込み式抗原抗体反応検出器（ガラスカプセル）が足環や首輪とデータ通信できれば、個体が同定出来るだけでなく感染の時期、その鳥相を推測できるので、鳥インフルエンザ感染の個体の追跡は一気に新展開する。と考えます。鳥の測位は、週に一、二度記録され、数百メートル程度の誤差は許容されるので、現代人の「測位=GPS」という発想から脱皮し、柔軟な発想が必要である。GPS より ADS-B 受信電力は 80dB 有利で、ホモダイン受信器でも工夫すれば受信できるレベルと考える。

3 技術開発

3-1 ADS-B 利用測位の概念

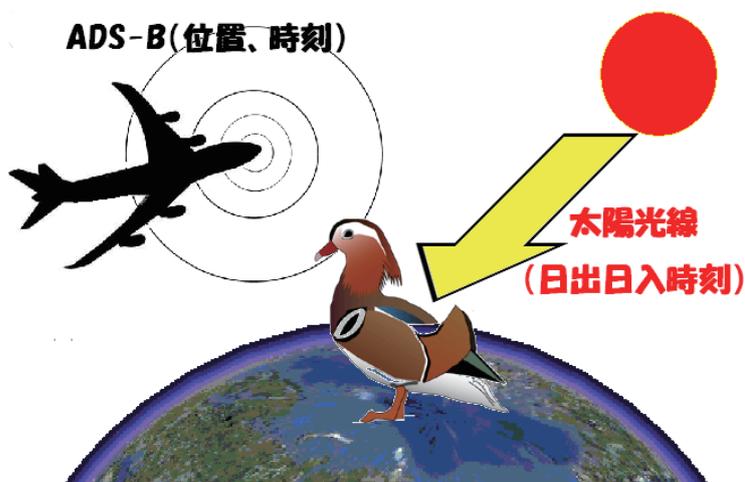


図1 ADS-B の受信概念

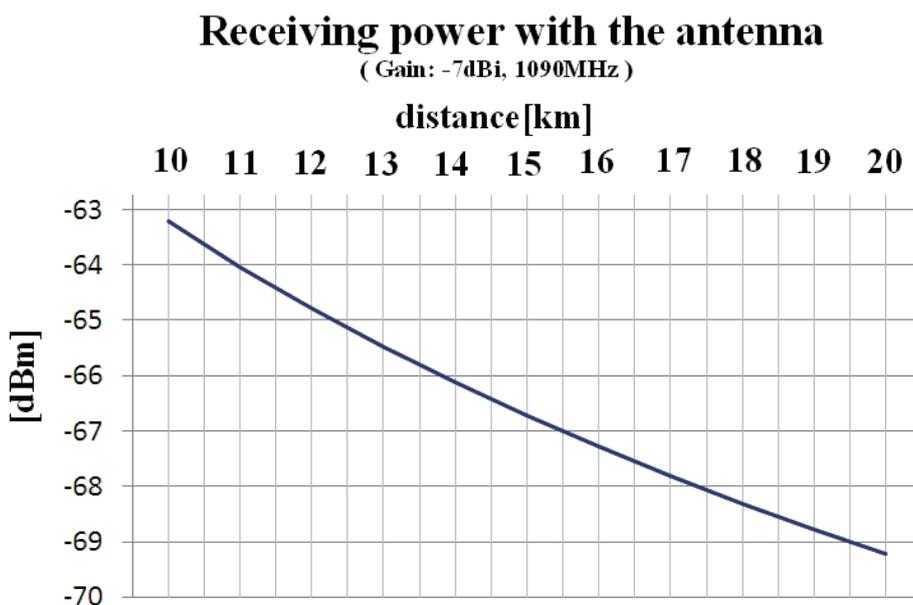
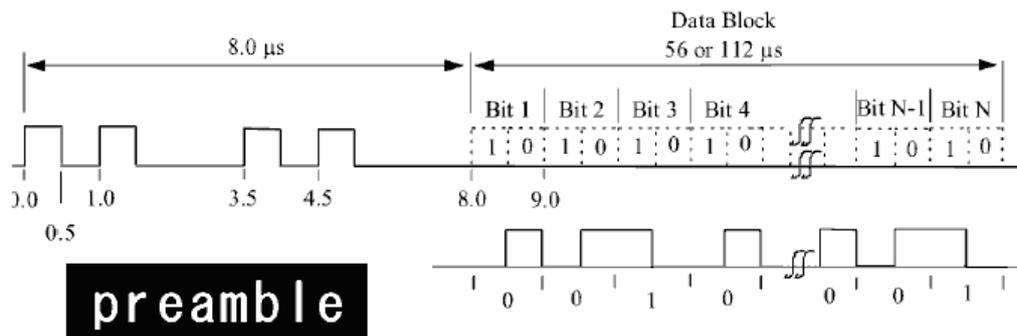


図2 自由空間伝搬損失

| | | |
|--------------------------------------|----------|---------|
| 航空機 => 首輪 | | |
| 周波数 | (GHz) | 1.09 |
| アンテナ利得 | (dB) | 0.00 |
| 送信電力 | (dBW) | 27.00 |
| EIRP | (dBW) | 27.00 |
| 自由空間伝搬損失 | (dB) | 119.21 |
| pointing損失 | (dB) | 3.00 |
| アンテナ利得 | (dB) | -7.02 |
| 受信電力 | (dBW) | -102.21 |
| 雑音温度 | (K) | 800.00 |
| 雑音電力密度 | (dBW/Hz) | -199.57 |
| G/T | (dB/K) | -36.05 |
| 上りC/N ₀ | (dB Hz) | 97.34 |
| 自由空間伝搬 | 20km | |
| 情報伝送速度 | (Mbps) | 1.00 |
| 誤り率 | | 1.0E-04 |
| E _b /N ₀ (PSK) | (dB) | 10.40 |
| 符号化利得 | (dB) | 0.00 |
| 所要C/N ₀ | (dB Hz) | 82.44 |
| マージン | (dB) | 14.9 |

図3 回線設計



00K modulation

| | | | | | | |
|-----------------------|---------|-------------------|-------------------------|--------------------|---------------------------------------|-----------|
| LONG SQUITTER | CONTROL | MODE S ADDRESS | ADS-B MESSAGE (56 BITS) | PARITY | 112 BITS | |
| SQUITTER TYPE | | | | | BROADCAST RATE (NUMBER/SECOND) | |
| AIRBORNE | | | | | | |
| POSITION | TYPE | STATUS | ALTITUDE | SPARE | TIME LAT LONG | 2 |
| VELOCITY | TYPE | E-W VEL | N-S VEL | TURN RATE | VERT RATE SPARE | 2 |
| SURFACE | | | | | | |
| | TYPE | MOVEMENT | GRD TRACK | SPARE | TIME LAT LONG | 2 |
| IDENTIFICATION | | | | | | |
| | TYPE | AIRCRAFT CATEGORY | | AIRCRAFT CALL SIGN | | 0.2 |
| EVENT DRIVEN | | | | | | |
| | TYPE | TBD | | | | AS NEEDED |

図4 パケットフォーマット

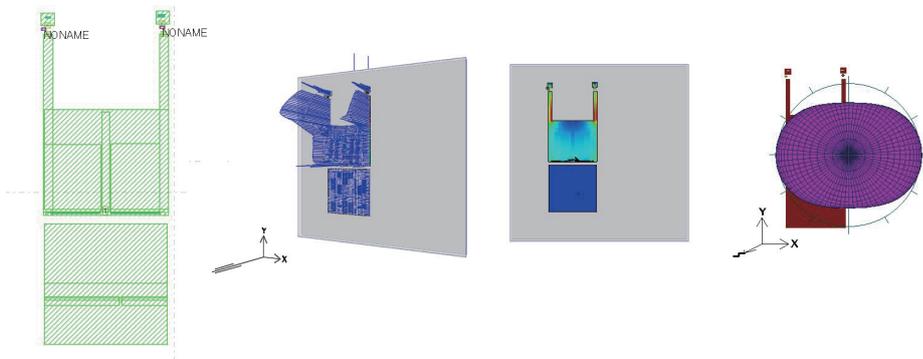
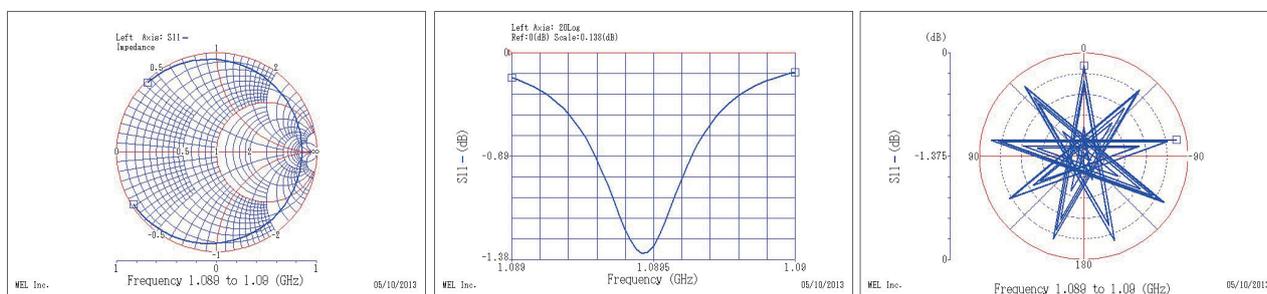
ADS-B のパケットフォーマットは内容が実質 56bits で、上記のこれらのどれかのフレームを受けることとなる。多くは位置情報であることは言うまでもない。

3-2 アンテナ

(1) パッチアンテナ

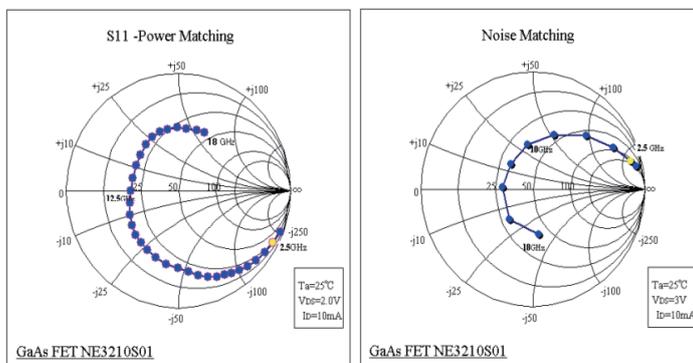
水禽に搭載する ADS-B パッチアンテナは、大きさが 30 mm x 45 mm の大きさで、U字をしている。S-NAP でシミュレーションした設計図を提示した。周波数の微妙な調整は、最終的に 2 つの 5P トリマーで行う。利得は軸方向で約 4.9[dBi] となる。なお、下にある四角の共振していないアンテナは、海鳥探査レーダー (3010MHz) のアンテナである。基本的には、LNA HEMT NEC3210S01 S11 ノイズマッチング共役複素数点に 1090MHz 付近が来るように製作する。

- 最大輻射方向 $\langle \theta = -0.0872665[\text{deg}] \quad \phi = 0.261799[\text{deg}] \rangle$
- 指向性利得 = 4.92021[dBi]
- 絶対電力利得(Ga) = -0.836042[dBi]
- 対半波長ダイポール利得(Gh)([dBi]-2.15) = -2.98604[dBd]
- 実効面積 ($\eta=1$) = 0.0187081[m²] (0.247065 λ^2)
- 実効面積 ($\eta=0.26569$) = 0.00497055[m²] (0.0656426 λ^2)
- 軸比 = 1 : 3.22682e-006 $\langle \text{co-polar:Vert cross-polar:Hor} \rangle$ もつと見る



3-2 LNA

LNA NEC3210S01 S11 の共役複素数の点がパッチアンテナの出力ポイントとなる。ここでは 1-2.5GHz で接続すると想定している。



スミスチャート (複素平面上) 共役複素数でアンテナと LNA(入出力)を合わせる事が原則である

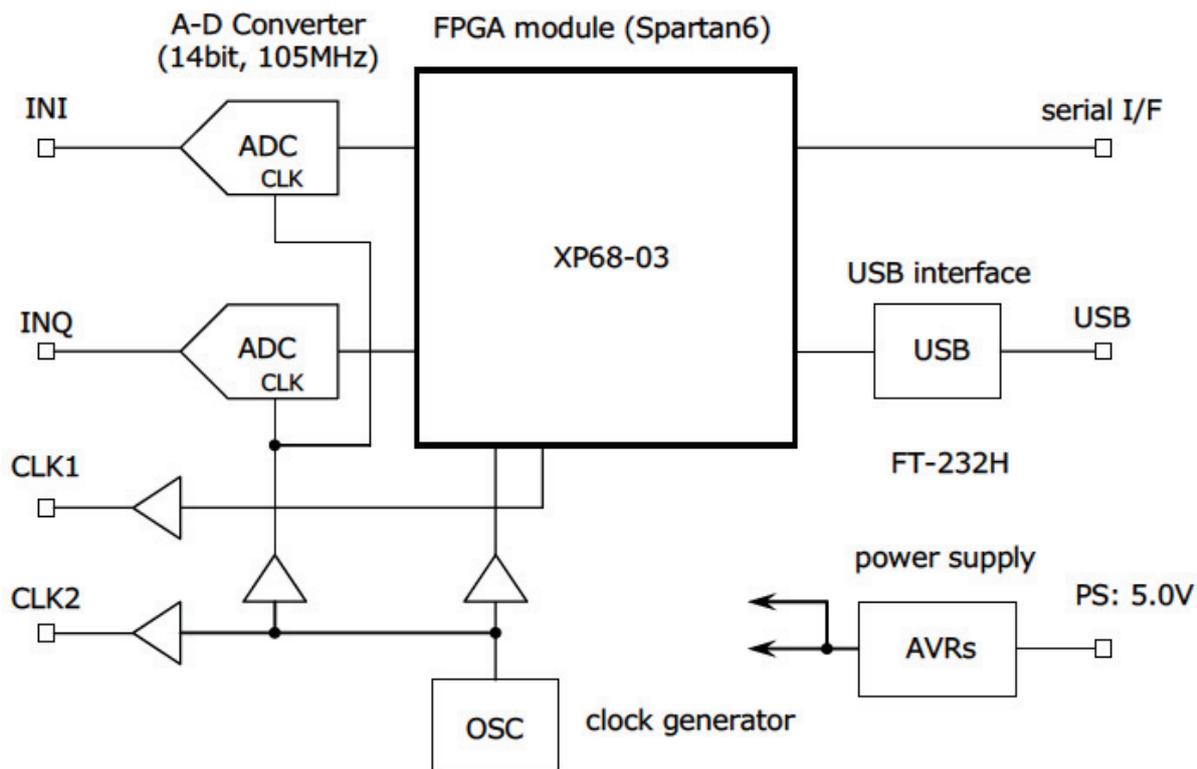


図2 ADS-B 信号処理 FPGA 基板 ブロック図

3-4 FPGA

(1) NCO と IQ_NCO

NCO (Numerically Controlled Oscillator) は、デジタル方式の正弦波の発振器のことで、「位相アキュムレータ」と、正弦波の波形を生成する「波形 ROM」を組み合わせたものです。位相アキュムレータは1クロックごとにその値が一定の値 (NCO が発生している正弦波の周波数に対応します) だけ毎回、増加していくレジスタのことで、レジスタの値が正弦波の「位相」の値を表現します。正弦波の波形を決定する波形 ROM は高い精度が必要で、実用的な 14 ビット～18 ビット程度の分解能を持った波形のデータは莫大な量のデータ (たとえば、18 ビットのデータ幅で、18 ビットのアドレスを持つ波形データは 5M ビット近いデータになり、FPGA に搭載されたメモリを全部使っても不足) となりますので、ROM の大きさを現実的な大きさに抑さえるためには、なんらかの工夫が必要である。三角関数の加法定理を用いて、NCO の波形 ROM の大きさを縮小する方法は、受信機の最初のステージに使用する高速な NCO にも適用できる優れた方法です。2 つの、36 ビット幅、512 ワードの ROM (360 度全周のデータを格納するメイン ROM と全周の 1/512 の詳細データを格納するサブ ROM) を用いることで 18 ビット精度の sin 波、cos 波を同時に生成します。図 5 にこの工夫を採り入れた NCO のブロック図を示します。正弦波の波形の 90 度ごとの対称性を利用して波形 ROM の大きさを縮小することもできますが、高速動作を狙ったことと、ROM 1 個のサイズに余裕があるため、今回は特に利用

していません。(iq_nco.vhd)

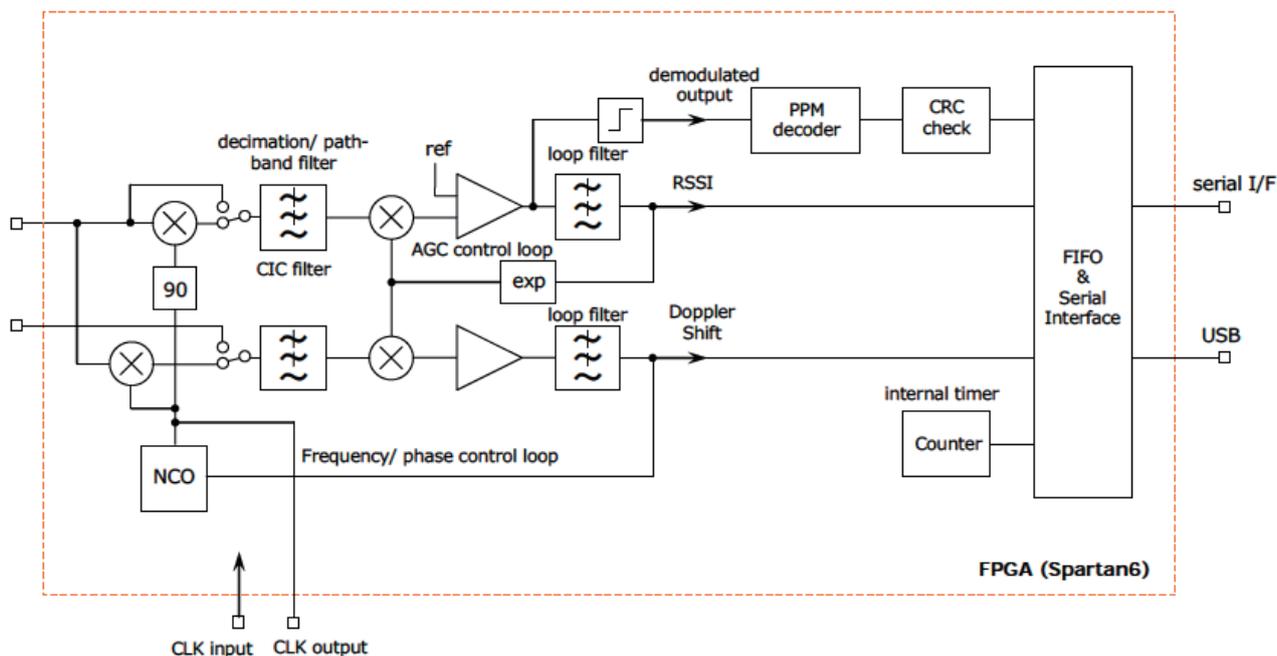
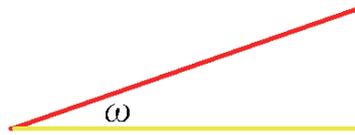
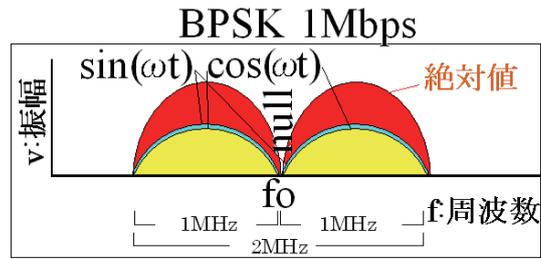


図3 FPGA に実装する DSP 受信機 ブロック図

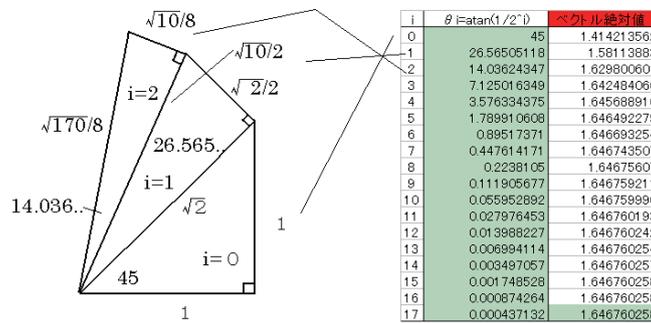
CORDIC は比較的単純な座標変換を連続して行い、その際の座標変換ごとの回転角が既知であることを利用する巧妙なアルゴリズムで、直交座標から極座標への変換や、その逆に、角度を与えて三角関数の値を求める等の使い方ができます。図は CORDIC の計算を行う時の基本的な座標変換の様子を示したものです。この座標変換では、現在の座標の値の2のべき乗分の1を加減算するという簡単な計算だけが必要となりますので、演算の負荷、リソースは小さくてすみ、高速な動作が期待できる。座標変換ごとの回転角は単純な値ではありませんが、あらかじめ計算しておくことができ、その値の格納に大きな容量は必要ではありませんので HDL 中のコードに直接、値を記述することもできますが、今回は FPGA の ROM の個数に余裕があるので CORDIC 本体とは別に専用の ROM を用意するようにした。

CORDIC の計算を行う基本の処理は、直交座標→極座標の変換、あるいは逆の、角度→三角関数値の変換、どちらでも共通に使うことができます、そこで、FM 復調で位相計算のために使う CORDIC と、ステレオ復調器のパイロット信号の発生で必要になる三角関数の計算で使う CORDIC を1つにまとめるよう、工夫してみました。(bcordic18hsr.vhd)

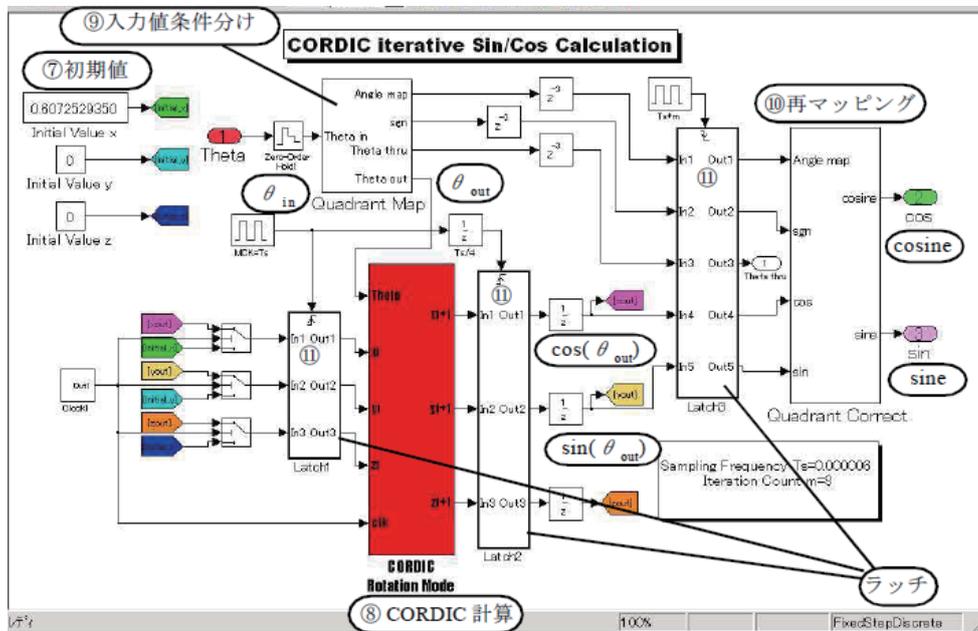


$$\text{絶対値} = \sqrt{\sin^2(\omega) + \cos^2(\omega)}$$

CORDIC



$$30^\circ = \theta_0 - \theta_1 + \theta_2 - \theta_3 + \theta_4 + \theta_5 - \theta_6 + \theta_7 - \theta_8 - \theta_9 + \theta_{10} + \theta_{11} - \theta_{12} + \theta_{13} - \theta_{14} - \theta_{15} + \theta_{16}$$



シムリンクによるシミュレーション例

4 結果

4-1 受信生データ

2013年4月26日16時21分25秒から0.5秒間 伊勢原市下糟屋143での0.5秒間のADS-B position formatの受信記録を表に示した。0.5秒でこれだけのデータが受信できることは驚愕に値する。

2013年4月26日16時21分25秒から0.5秒間 伊勢原市下糟屋143 0.5秒間のADS-B受信を記録、

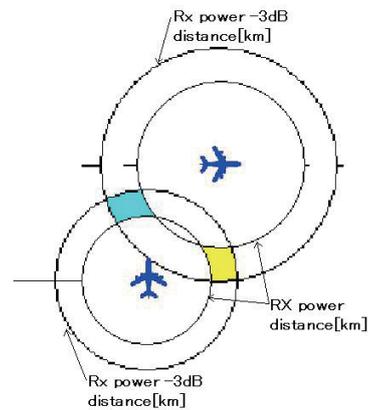
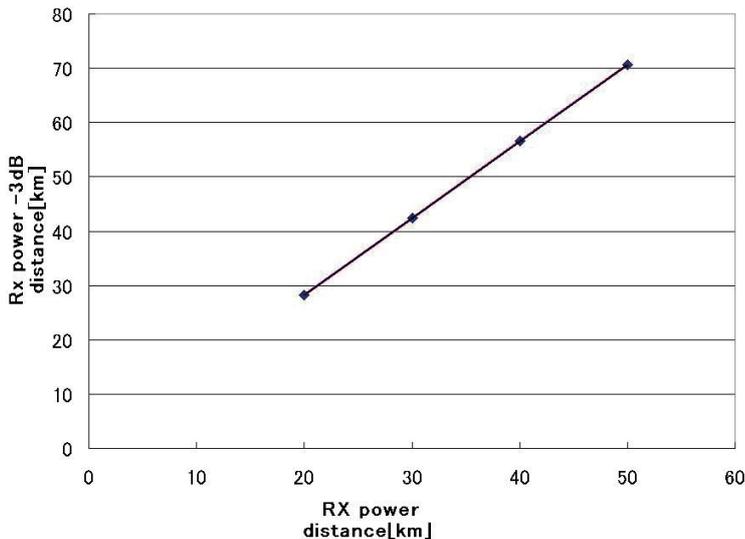
| | 航空機 | 航空機側の時間 | 受信時間 | 高度[ft] | 緯度 | 経度 |
|----|-----|----------------|---------|--------|----------|-----------|
| 2 | 130 | 8681B1 21:24.7 | 21:25.5 | 35650 | 34.51016 | 138.08710 |
| 3 | 130 | 8681B1 21:25.1 | 21:25.5 | 35650 | 34.5098 | 138.08817 |
| 7 | 60 | 8686B2 21:24.9 | 21:25.5 | 28975 | 34.57663 | 138.38087 |
| 14 | 190 | 862DB6 21:24.9 | 21:25.5 | 38800 | 34.61583 | 137.73457 |
| 15 | 190 | 862DB6 21:25.3 | 21:25.5 | 38775 | 34.61513 | 137.73565 |
| 27 | 130 | 8681B1 21:25.7 | 21:26.5 | 35650 | 34.50931 | 138.08985 |

以下、文末の資料に添付

4-2 受信電力とドップラーシフトによる測位

自由空間伝播の式より受信電力から距離が推定できる。受信電力は環境にも依存するので、-3dBの猶予を持たせ、この範囲の距離に送信機と受信機は位置すると想定する。この確率密度関数は、見通し通信であるので、対数正規分布であるライス分布を基本としており、受信電力-3dBの範囲には論理的には68%の事象が収容される。もし2機の航空機からほぼ同時に受信電力を記録できれば、実・虚の2つのエリアが推定できる。

この2つのエリアのどちらかをドップラーシフトで否定（虚エリアの否定）し、ドップラーシフトのデータ、航空機の位置データ、時刻より最小二乗法を使って位置を求め、エリア内の位置精度を高める。



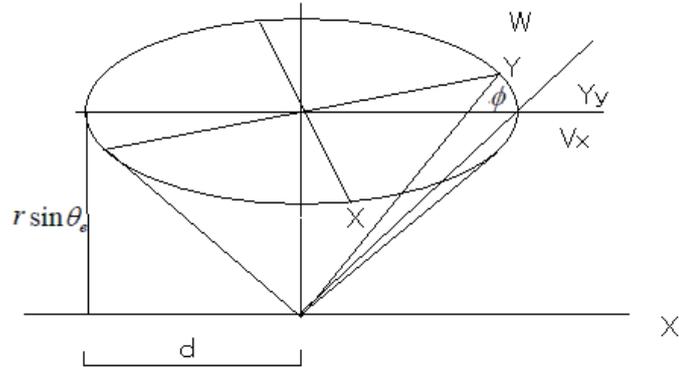
振幅成分より実と虚のエリアが推測される

航空機とADS-B受信機の距離は、概ね10-100km程度で1秒間の光速に比して十分小さいので、この距離にかかる伝送時間は無視する。一方、航空機側のGPS受信の位置は、ADS-B受信機の受信時間と Δt の時間差があり、航空機は移動距離 $=\Delta t * (\text{飛行速度})$ だけ離れており、ドップラーシフトの計算位置の誤差となる。そこで航空機は速度、飛行方位、高度変化が受信できた航空機のみをデータとして使うことにしたいが、この項目を2013年4月段階で、常に送信していない航空機も存在する。そこで個々の複数のGPS移動位置から受信側で速度と方位と高度変化を受信側で演算し、飛行速度と高度変化を求め、航空機の Δt での移動距離を逆算しなければならない。これらはADS-B受信データから幾何学的に推定可能である。

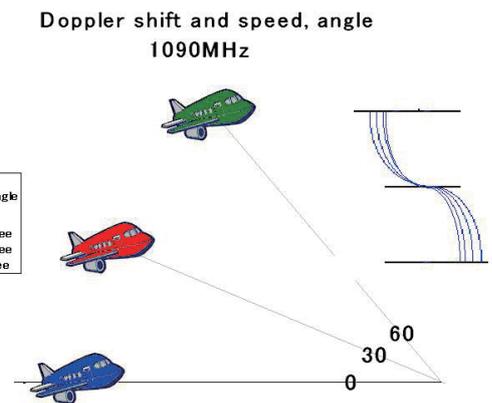
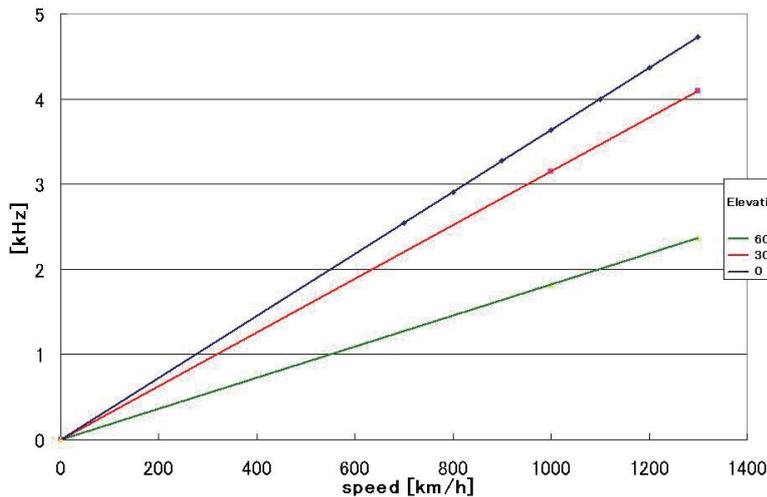
$$v_r = +\omega_0 \sin \theta_e + \frac{1}{2}(u_x + v_y)r \cos^2 \theta_e$$

$$+ v_0 \cos \theta_e \cos \phi + u_0 \cos \theta_e \sin \phi$$

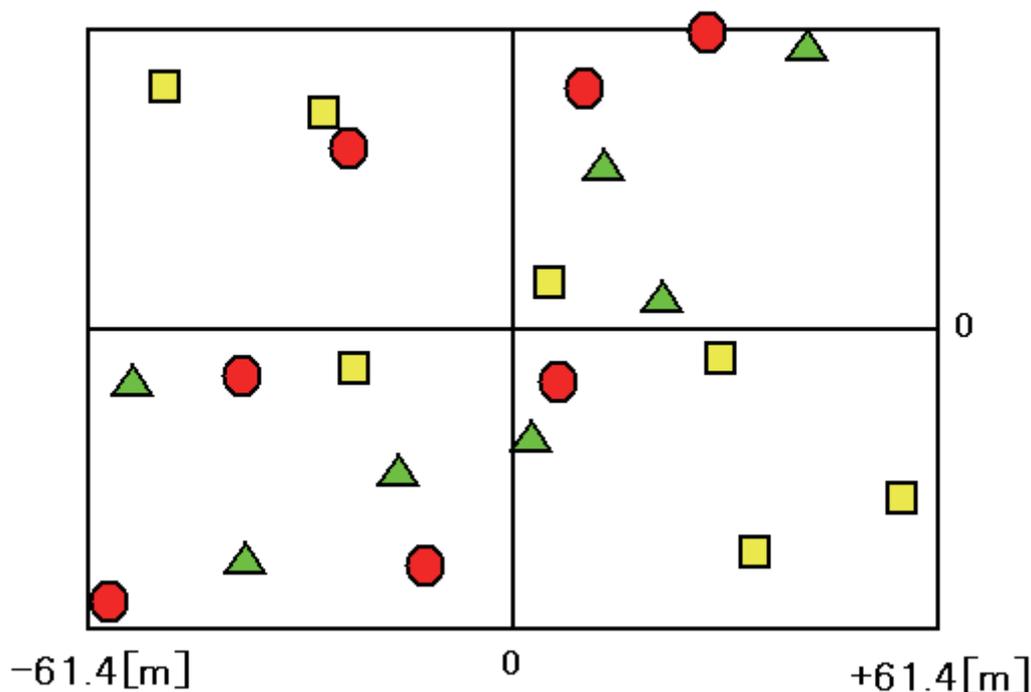
$$+ \frac{1}{2}(v_y - u_x)r \cos^2 \theta_e \cos 2\phi + \frac{1}{2}(v_x + u_y)r \cos^2 \theta_e \sin 2\phi$$



受信機からみた航空機の幾何学座標
(距離が短いので地球をここでは平らとして計算)



0.5 秒のウィンドウを 10 秒間ごとにできるだけ多くの受信周波数の平均値を出し、これを基にしてドップラーシフトを演算し、自己の推定座標（ここでは簡便法として地球を球として計算）をそれぞれ 1 パスで 7 個の位置を求めた。3 機分、21 個の座標は、1 パスで誤差、 ± 2 秒 = ± 61 m 内に求められることが判った。これらを複数機で加算平均すれば 1 桁低い範囲の推定値となる。パルス成分の短い ADS-B の周波数偏位を求めることが意外と困難なので、時間軸上に周波数をトレンドし、単位時間に加算して平均する方法で、さらにドップラーシフトと振幅（受信電力）の推定エリアを加味して、位置精度を ± 2 秒 (± 61.4 m : 伊勢原) 程度の誤差で求めることが可能と思われる。なお、緯度の 1 分が 1 海里 (1854m) とほぼ等しく、 $DEG = 度 + (分 + 秒 \div 60) \div 60$ で計算する。



謝辞

本研究の核である FPGA のプログラム、および設計は、わが国有数の科学技術開発者 林輝彦氏（株式会社 ソリトンシステムズ）の指導を受けました。科学技術弁護士 田中徳夫先生の日ごろのご指導に感謝致します。

【参考文献】

1. 独立行政法人 電子航法研究所、ADS-Bの概要、資料10-S 作2-5 41
2. 林輝彦、デジタルFMステレオチューナーの製作、デジタルデザインテクノロジー No. 1, 2009

〈発表資料〉

| 題 名 | 掲載誌・学会名等 | 発表年月 |
|--|---|----------|
| フェージングシミュレータによる鳥装着用S帯送受信モジュールの伝搬特性の解析 | 日本遠隔医療学会雑誌 | 2012. 9 |
| A Study on New Ku-band Digital Transponder- Built-in Terminal to the Leg Ring to Track Avian Influenza - | 2012 IEEE 14th International Conference on e-Health Networking, Applications and Services (Healthcom) | 2012. 10 |
| Required EMS Channels via Satellite Communications after Major Disaster | 2012 IEEE 14th International Conference on e-Health Networking, Applications and Services (Healthcom) | 2012. 10 |