

宇宙通信工学実習テキスト

Space Communication Engineering

September 2014



目次

1 衛星軌道計算実習	4
1.1 軌道計算・出力可視化手順	4
1.1.1 軌道計算設定ファイルの編集	4
1.1.2 軌道計算の実行	5
1.1.3 軌道計算結果の可視化	5
1.1.4 軌道計算結果 PDF への変換とアップロード (希望者のみ)	7
1.2 実習課題	8
2 極軌道気象衛星受信実習	10
2.1 受信を行う気象衛星の概要	10
2.2 人工衛星追尾システムの概要	11
2.2.1 菅平宇宙電波観測所の人工衛星電波受信システム構成	11
2.2.2 衛星電波受信アンテナ部	12
2.2.3 アンテナ駆動部	12
2.2.4 衛星追尾受信システムコンソール	12
2.3 NOAA 追尾操作	13
2.3.1 初期設定	13
2.3.2 可視軌道ファイルの作成 - 軌道計算実習において	14
2.3.3 可視軌道ファイルの読み込み	15
2.3.4 追尾開始準備	15
2.3.5 追尾開始	15
2.3.6 追尾終了確認	16
2.3.7 異常時の対応	16
2.4 NOAA 衛星気象画像データの取得	17
2.5 実習課題	18
3 極軌道衛星と静止軌道衛星の画像データ分析実習	19
3.1 方法	19
3.2 NOAA 衛星受信データの分析	19
3.3 静止軌道衛星ひまわり受信データの分析	20
3.4 実習課題	21
4 プログラミング言語 IDL を用いた画像処理の実習	22
4.1 方法	22
4.2 具体的なコンピュータ処理	22

4.3	実習課題	26
5	放送衛星受信実習	27
5.1	放送衛星概論	27
5.2	静止衛星方向の決定	28
5.3	使用機器	28
5.4	BS アンテナ指向方向決定手順	29
5.4.1	準備	29
5.4.2	方位角・仰角粗調整	30
5.4.3	アンテナ指向方向微調整による BS 方向決定	31
5.5	BS および CS の信号スペクトル測定	31
5.6	実習課題	32
6	GPS 衛星受信実習	34
6.1	GPS システム概要	34
6.2	GPS 衛星測位信号受信実習	34
6.2.1	ハンディタイプ衛星測位信号受信機の操作方法	35
6.2.2	取得データの処理方法	37
6.3	GPS 衛星測位信号定点観測実習	40
6.3.1	使用機器	40
6.3.2	時刻比較	40
6.3.3	測位データの取得	40
6.4	実習課題	41
7	アマチュア無線衛星通信実習（特別実習）	43
7.1	アマチュア無線衛星通信概論	43
7.2	アマチュア無線衛星通信に用いる設備	44
7.2.1	室内設備の概要	44
7.2.2	屋外設備（アンテナ系）の概要	47
7.2.3	システム概要のまとめ	48
7.3	ドップラーシフトと時間遅れの観測	49
7.3.1	ドップラーシフトの観測	49
7.3.2	時間遅れの観測	49
7.4	テレメトリデータ受信	50
7.4.1	テレメトリ解読方法概要	50
7.4.2	テレメトリ解読例	51
7.5	実習課題（希望者のみ）	52

実習課題 1

衛星軌道計算実習

目的

極軌道衛星 NOAA の軌道を計算し、予測軌道の可視化を行うことで衛星追尾計画の策定を行う。

1.1 軌道計算・出力可視化手順

軌道計算は、Windows がインストールされているノートパソコンで行う。各自 1 台ずつ使うことができる。軌道計算の設定ファイル・軌道計算プログラム・計算結果可視化ソフトは、すべてデスクトップ上の **軌道計算〇〇** というフォルダに入っている (〇〇 はグループ番号)、まずはじめにそのフォルダを開く。

1.1.1 軌道計算設定ファイルの編集

軌道計算を行うためには、まず計算の設定ファイルを編集する必要がある。設定ファイルは、計算を行う衛星ごとにそのサンプルが用意されており、ファイル名 は、ELNOAA15.DAT, ELNOAA16.DAT, ELNOAA17.DAT, ELNOAA18.DAT, ELNOAA19.DAT などとなっている。設定ファイルは、以下に示されるように全体で 5 行からなる。

```
Line-1 8
Line-2 2012    9    6    0    0    0    30 5000    1
Line-3 2012    9    1    0   11   2615546
Line-4 7189.946 .001320 98.630 286.776 352.078 8.026
Line-5      .000 + .980470 -2.925240 14.231810
```

第 1 行 出力先指定

計算結果出力先の指定。8: ファイル (PLROBD.DAT) に出力, 6: 画面に出力。通常はファイルに出力。

第 2 行 計算開始日時、計算間隔、計算回数、受信点

```
Line-2 2012    9    6   10   30    0    30 5000    1
      yyyy   mm   dd   hh   mm   ss   iii jjjj    k
```

計算開始日時 (UT=JST-9): yyyy/mm/dd hh:mm:ss
計算間隔 (秒): iii

計算回数: jjjj
受信点: k=1 (菅平宇宙電波観測所)

第3行 軌道元期日時、軌道番号

```
Line-3 2012    9    1    1    38  4949526
        yyyy   mm   dd   hh   mm  ssnnnnnn
```

軌道元期日時 (UT): yyyy/mm/dd hh:mm:ss 軌道番号: nnnnn

第4行 軌道長半径、軌道離心率、軌道傾斜角、昇降点赤経、近地点引数、平均近地点離角 (軌道6要素)

```
Line-4 7189.946  .001320    98.630  286.776  352.078    8.026
        aaaa.aaa  .eeeeee   iii.iii  jjj.jjj  kkk.kkk  mmm.mmm
```

軌道長半径 (km): aaaa.aaa 昇降点赤経 (°): jjj.jjj
 軌道離心率: .eeeeee 近地点引数 (°): kkk.kkk
 軌道傾斜角 (°): iii.iii 平均近地点離角 (°): mmm.mmm

第5行 軌道長半径変化率、昇交点赤経変化率、近地点引数変化率、日周回数

```
Line-5      .000 + .980470 -2.925240 14.231810
        pppp.ppp qq.qqqqqq rr.rrrrrr nn.nnnnnn
```

軌道長半径変化率 (km/day): pppp.ppp 近地点引数変化率 (°/day): rr.rrrrrr
 昇交点赤経変化率 (°/day): qq.qqqqqq 日周回数 (回/day): nn.nnnnnn

3-5 行にはあらかじめ取得した元期日時・軌道要素・軌道要素変化率が設定されている。軌道計算をする際に変更を行うのは2行目のみである。設定ファイルをメモ帳などのエディタで開き、計算の開始日時、計算間隔、計算回数を変更する。設定ファイルの計算開始時間は世界標準時 (UT=JST-9 時間) で入力すること (テキストに添付されている可視予測は日本時間 JST で記載されている)。

1.1.2 軌道計算の実行

軌道計算ソフトは、PLROBV.EXE という実行形式で与えられている。PLROBV.EXE をダブルクリックすると、UNIT 7?_ というターミナルプロンプトが現れる。このプロンプトへ、先ほど保存した軌道計算設定ファイルの名前を入力する。例えば、軌道計算設定ファイルの名前が ELNOAA14.DAT であった場合、以下のように入力し、**Enter** を押せばよい。

```
UNIT 7?  ELNOAA14.DAT 
```

軌道計算の結果は、PLROBD.DAT というファイルに出力される。やはりこのファイルもメモ帳などで開くことができ、中身を確認することが可能である。この計算結果出力ファイルのフォーマットは、この章の末尾にまとめてある。

1.1.3 軌道計算結果の可視化

計算結果出力ファイルを可視化するには、IDL (Interactive Data Language) という科学データ処理言語で書かれた plot_orbit というプログラムを用いる。以下、使用方法を簡単に示しておく。

- ① 軌道計算〇〇 のフォルダの中の plot_orbit.sav というファイルをダブルクリックする。

- ② IDL の起動画面が現われるので、**click to continue** をクリックする。
- ③ 画面左上に図 1.1 のようなメニューウィンドウが現れる。
- ④ 一番上の **Read File** を押すと図 1.2 のようなファイル選択ウィンドウが現れるので、計算した結果が出力されている PLROBD.DAT を選択する。

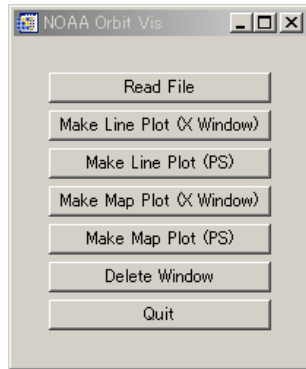


図 1.1 メニューウィンドウ

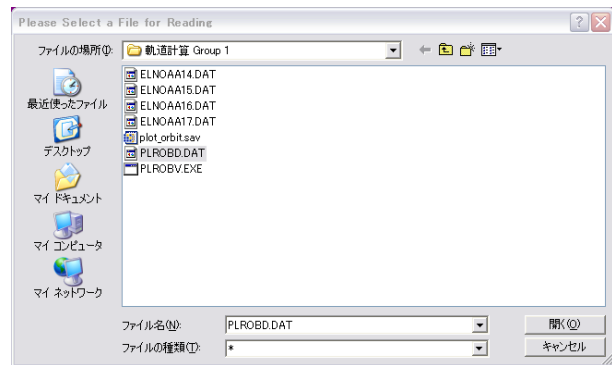


図 1.2 軌道計算結果ファイル選択画面

- ⑤ メニューウィンドウの **Make Line Plot (X Window)** を押すと、高度・緯度・経度・仰角・方位角・距離 (菅平からの) が時系列ラインプロットの形式で表示される (図 1.3 参照)。
- ⑥ メニューウィンドウの **Make Map Plot (X Window)** を押すと、地図上に衛星位置の時間変化が表示される (図 1.4 参照)。

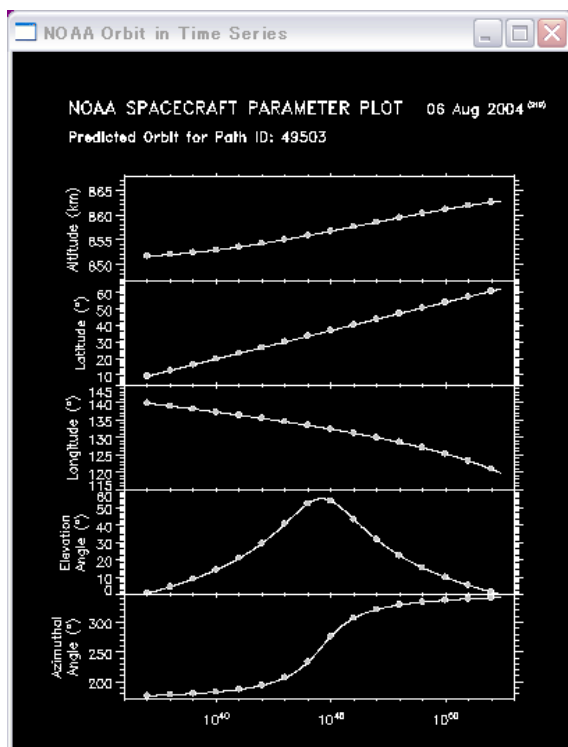


図 1.3 予測軌道ラインプロット出力例

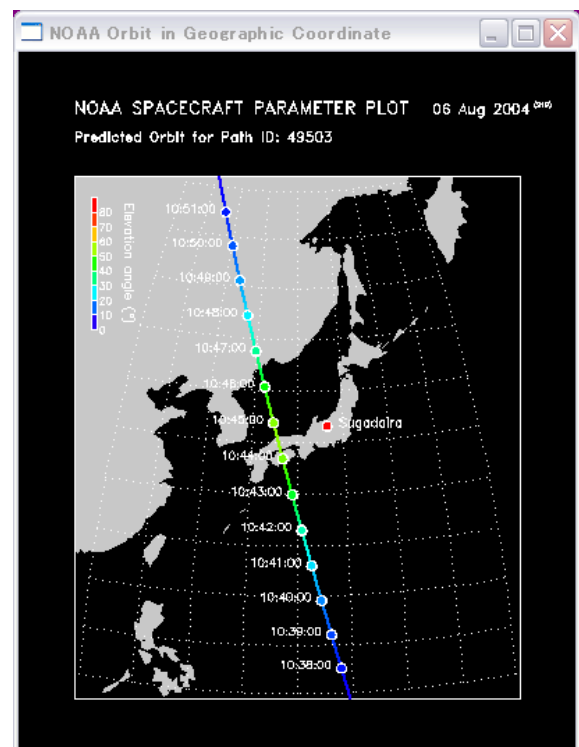


図 1.4 予測軌道マッププロット出力例

- ⑦ **Make Line Plot (PS)** を押すと **図 1.5** に示されるように予測軌道のラインプロットが印刷用の PostScript ファイルとして保存される (ファイル名: orbit_line.ps)。orbit_line.ps のアイコンをダブルクリックして、ビューアを起動し、画像の閲覧ができる。印刷するにはメニューの File から Print を選択。
- ⑧ **Make Map Plot (PS)** を押すと、**図 1.6** に示されるように、マップ形式のプロットが PostScript ファイルとして保存される (ファイル名: orbit_map.ps)。上と同様に、ビューアで確認してから印刷する。

NOAA SPACECRAFT PARAMETER PLOT 06 Aug 2004⁽²¹⁹⁾
Predicted Orbit for Path ID: 49503

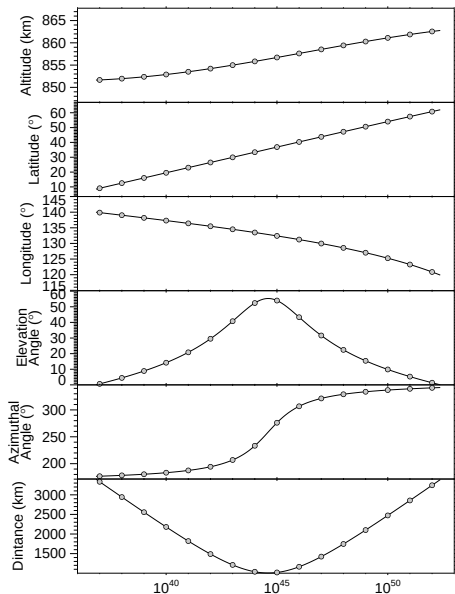


図 1.5 予測軌道ラインプロット印刷用ファイル出力例

NOAA SPACECRAFT PARAMETER PLOT 06 Aug 2004⁽²¹⁹⁾
Predicted Orbit for Path ID: 49503

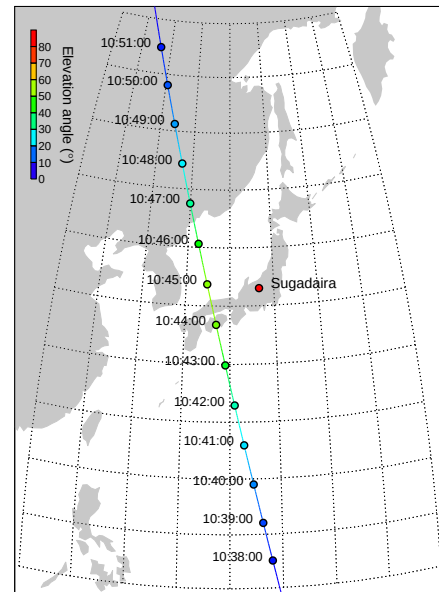


図 1.6 予測軌道マッププロット印刷用ファイル出力例

1.1.4 軌道計算結果 PDF への変換とアップロード (希望者のみ)

印刷用のファイルは PostScript という形式の画像ファイルである。もし、自宅でこの画像ファイルを印刷などしたい場合は、PDF ファイルに変換してから持ち帰るとよい。ビューアのメニュー File から Convert を選択すると以下のようなダイアログがでる。

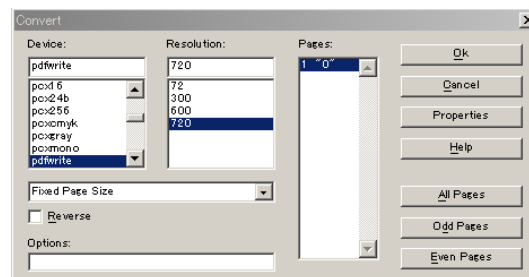


図 1.7 PDF 保存用ダイアログ

ここで、一番左の Device のところで pdfwrite を選択し、**OK** を押せば、保存ファイル名を聞くダイアログがでるので、適宜名前をつける。保存場所はデスクトップで構わない。この PDF ファイルを USB メモリなどを持参している人はそのメモリ経由で画像を家に持ち帰るとよい。そのようなメディアを持ってきていない人は、自分のものとわかる名

前で保存したファイルを宇宙通信工学用のデータ保存サーバーへアップロードしておき、自宅からダウンロードすることができる(但し、他のメンバーもそのファイルを自由にダウンロードできてしまう)。アップロードしたいファイルを右クリックし、「送る」から upload-group ○ を選択。○ の部分は班番号。自宅から以下のアドレスにアクセスしダウンロードできる: <http://gwave.ice.uec.ac.jp/~sce/>。

1.2 実習課題

1. 今回の実習で受信する予定の NOAA 衛星の可視時間を選び、軌道計算を実行せよ。計算間隔は 1 秒が望ましい。追尾実習では、ひとつの班につき複数のパスで衛星の追尾を行う予定である(練習パス、本番パス)。それぞれのパスについて、分担して軌道計算の実行・分析を行い、レポートでは、自分がどのパスについて軌道計算を行ったかを明記すること。
2. 軌道計算プログラムを実行して得られる可視軌道数値ファイル (PLROBD.DAT) を実習課題 2 の衛星追尾で使用する。具体的には、このファイルをアンテナ制御プログラムに読み込んで、アンテナを衛星の方向へ時々刻々ポインティングし、自動追尾を行う。練習パス、本番パスの双方について、この可視軌道ファイルを作成のうえ、グループに配布された USB メモリへコピーする。
3. 高度・方位角・仰角・緯度・経度・距離の時間変化のラインプロットと、地図上に衛星位置をプロットしたものを作成せよ。レポートにはその全てのプロットを添付し、衛星の軌道に関して簡単にコメントせよ。
4. 衛星の軌道に関して以下の点を検討し、簡潔にレポートにまとめよ。
 - ① 計算結果の数値データ (PLROBD.DAT) をメモ帳で開く。次のページにあるアンテナの視野図の上に、時々刻々移動していく衛星の位置を手で書き込む。このとき、時刻を合わせて書き込んでおくこと。どのくらいの時間間隔で書くかは各自の判断に任せるが、可視時間の長い軌道については 1 分間隔、短い軌道については 30 秒毎程度が目安である。
 - ② 衛星が見え始める時刻と、そのときの仰角・方位角を求める。追尾実習時には、ここで求めた仰角・方位角に衛星が達したときに衛星からの電波が届き始めることになる(同様に、衛星が見えなくなる時刻と、そのときの仰角・方位角を求めておく)。
 - ③ 衛星が天頂に近づき、動きが速くなった時に、どのくらいのスピードで仰角・方位角が変化するかを考察する

★ 軌道計算結果出力ファイル (PLROBD.DAT) フォーマット解説

```
nnnnn yyyy/mm/dd hh:mm:ss s HHH.HH NNN.NN EEE.EE ee.ee aaa.aa dddd.d
49503 2004/ 8/ 6 10:37:58 * 851.95 12.46 139.06 4.32 178.23 2955.8 B D
49503 2004/ 8/ 6 10:37:59 * 851.95 12.51 139.04 4.39 178.26 2949.3 B D
49503 2004/ 8/ 6 10:38: 0 * 851.96 12.57 139.03 4.46 178.29 2942.8 B D
49503 2004/ 8/ 6 10:38: 1 * 851.96 12.63 139.01 4.53 178.32 2936.4 B D
```

nnnnn	軌道番号	yyyy/mm/dd hh:mm:ss	年月日 時刻 (UT)
s	仰角 5 度以上のサイン	HHH.HH	地上高 (km)
NNN.NN	北緯 (°)	EEE.EE	東経 (°)
ee.ee	仰角 (°)	aaa.aa	方位角 (°)
dddd.d	距離 (km)		

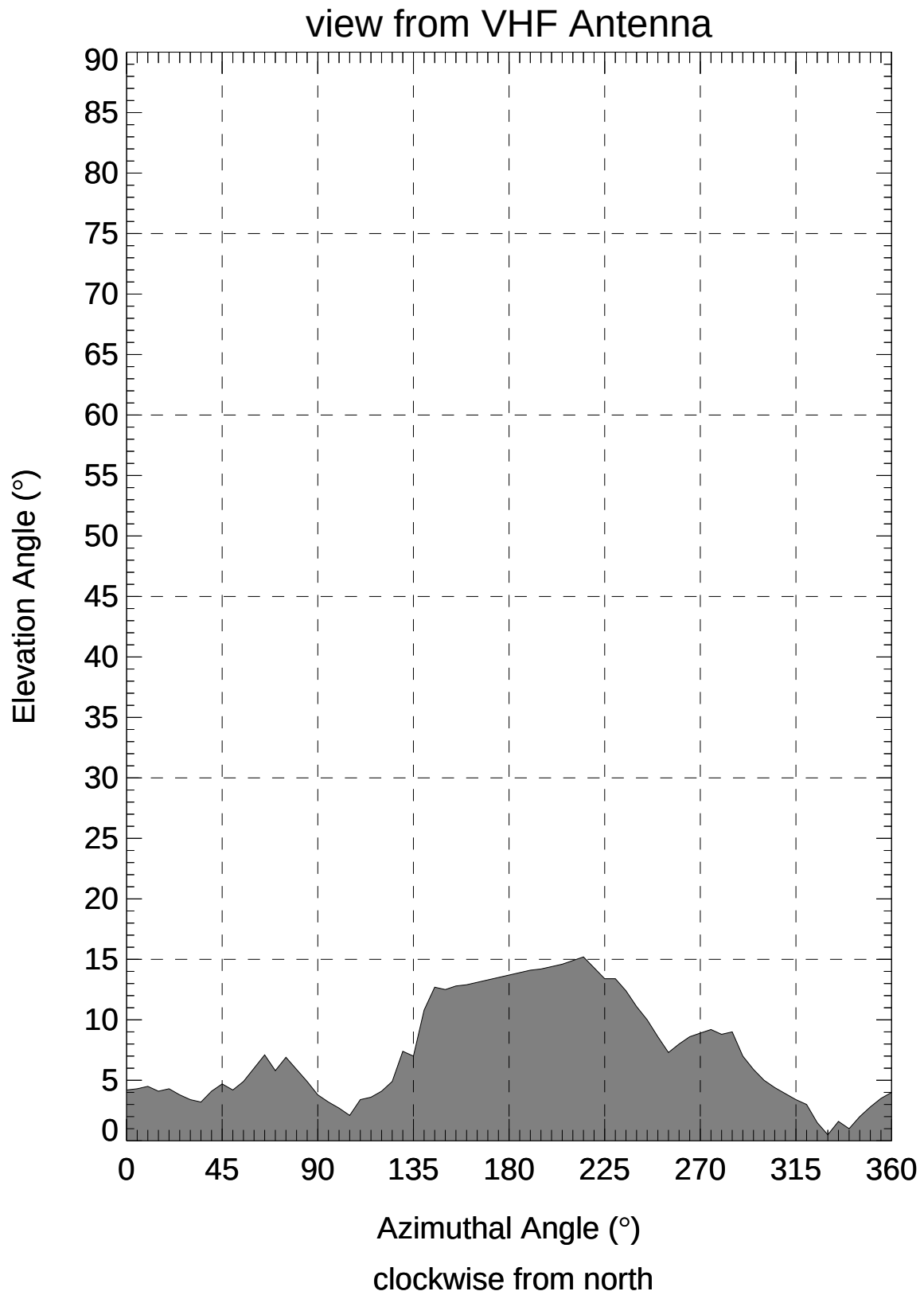


図 1.8 広帯域受信アンテナ系 (略称: SAT-ant-D) から見える稜線 (横軸: 方位角, 縦軸: 仰角)

実習課題 2

極軌道気象衛星受信実習

目的

極軌道気象衛星 NOAA の追尾を行い、実時間気象画像を受信することで、低軌道衛星追尾操作全体の理解を図る。

2.1 受信を行う気象衛星の概要

異なる軌道にある 2 種類の気象衛星

気象衛星には、図 2.1 のようにその飛翔軌道により大きく分けて二つの種類がある。ひとつは、静止軌道上 (36,000 km 上空の円軌道) から地球上の広い範囲の気象画像を撮影している衛星 (静止軌道気象衛星) である。現在、アメリカ、欧州、日本が、それぞれの経度域の上空で衛星の運用を行っている。もうひとつは、低高度極軌道 (周回周期約 100 分) から、地球上の狭い領域を高い空間分解能で撮像している衛星 (極軌道気象衛星) である。実習課題 3 において、日本の静止軌道衛星「ひまわり」(6 号: MTSAT-1R, 7 号: MTSAT-2) の受信を扱い、実習課題 2 において低高度極軌道を周回する NOAA 衛星の受信を扱う。実習課題 2 では、菅平上空をあらゆる方向に高速で飛翔する極軌道衛星 NOAA を正確に追尾して、その微弱な電波を受信し、NOAA 衛星から送られてくる高解像度気象画像データを実時間取得する。以下、この衛星の概要を述べる。

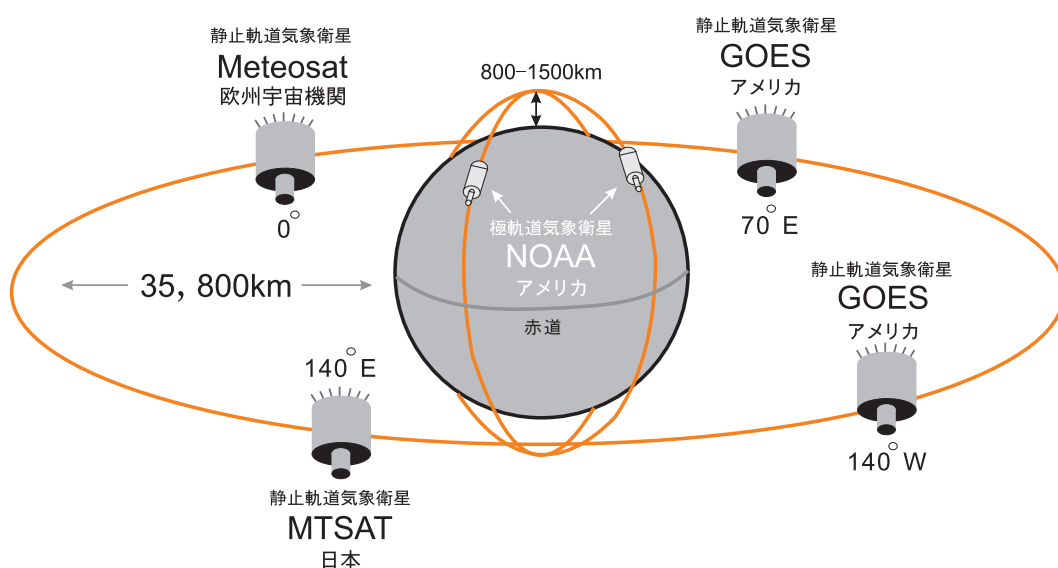


図 2.1 気象衛星の軌道概念図

極軌道気象衛星: NOAA

NOAA 衛星は、アメリカ海洋大気庁 (NOAA: National Oceanic and Atmosphere Administration) が管理・運用している気象衛星である。図 2.1 に示すように、赤道から固定観測を行う各国の静止気象衛星群と、両極を含めて全球観測可能な NOAA 衛星が相補的に機能して、宇宙からの全球観測を行っている。NOAA 衛星は、常に 2 機以上 (2011 年 8 月現在 5 機) が稼働し、日出日没線に沿って飛翔している衛星と正午と真夜中を飛翔している衛星の二つに分けられる。

NOAA 衛星の特徴

第一の特徴はその軌道にある。NOAA 衛星は、軌道平均高度 800–850 km、軌道傾斜角約 98 度、周期約 102 分、回帰周期 9 日の軌道を取る。NOAA 衛星は軌道高度が低いため、より高精度な地上走査が可能となっている。二番目の特徴は、多数の地球観測機器だけでなく救難機器も一緒に搭載されていることである。NOAA 衛星には AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer)、TOVS (TIROS Operational Vertical Sounder) 等の気象センサが搭載されており、雲・地表面温度分布の探査、気温・大気組成の鉛直分布の探査といった気象業務に利用されている。NOAA 衛星は、気象業務以外にも地球環境の監視を目的とする ERBE (Earth Radiation Budget Experiment)、SBUV/2 (Solar Backscatter Ultraviolet Radiometer) や、探索救助信号中継機能 (SAR: Search and Rescue system) を有し、非常に多目的に利用されている。三番目の特徴は、NOAA 衛星が取得したデータの利用者への配布方法にある。NOAA 衛星には、取得した全てのセンサデータをセンサの空間分解能を落とししたり、チャンネルを減らしたりすることなくリアルタイムに地上へ送る機能 (High Resolution Picture Transmission: 高分解能画像伝達系) がある。そうして送られてきたデータは HRPT データと呼ばれる。HRPT データは受信局さえあれば無料で利用することができ、日本各地にも多数の受信局がある。本実習でも、この HRPT データを利用したリモートセンシングデータの受信を行っている。

気象衛星 NOAA の周回軌道・運用状況概要

NOAA 衛星軌道は、真円に近い太陽同期極軌道で南北極を周回する。軌道高度は 809–854 km、軌道傾斜角度は 98.4–99.1 度、周期は 102.1 分と 101.2 分である。なお、太陽同期軌道とは、地球上のある地域の上空を同一地方時、同一方向に通過する軌道のことであり、地球探査衛星はこの軌道を取ることが多い。NOAA 衛星の場合、日出日線に沿って観測する朝夕型と真夜中正午の子午線付近を観測する昼夜型に分けられる。以下の表 2.1 に、NOAA 衛星の軌道要素と現在の運用状況を示す。

	NOAA-15	NOAA-16	NOAA-17	NOAA-18	NOAA-19
打ち上げ	1998/05/13	2000/09/21	2002/06/24	2005/05/20	2009
軌道高度	809 km	849 km	809 km	853 km	854 km
軌道傾斜角	98.7°	99.1°	98.4°	99.0°	98.8°
公転周期	101.1 min	102.0 min	101.2 min	102.1 min	102.1 min
運用状態	待機 (朝夕)	運用中 (朝夕)	運用中 (朝夕)	運用中 (昼夜)	運用中 (昼夜)

表 2.1 現在稼働中の NOAA 衛星の運用状態

2.2 人工衛星追尾システムの概要

2.2.1 菅平宇宙電波観測所の人工衛星電波受信システム構成

菅平宇宙電波観測所には、入口付近台座上の 3.6 mφ パラボラアンテナ (略称: SAT-ant-A)、研究棟屋上の 3.6 mφ パラボラアンテナ (略称: SAT-ant-B)、敷地中央のコンクリート柱上の 1.2 mφ オフセットパラボラアンテナ (略称: SAT-ant-C)、研究棟屋上の 4 組の直交対数周期 (ログペリ) アンテナと 1.8 mφ パラボラアンテナを同架した広帯域受信アンテナ系 (略称: SAT-ant-D) の 4 つのシステムが設置されている。これら 4 つの受信システムのうち、SAT-ant-A, B, D の 3 つは方位角および仰角を制御できる駆動台 (ペDESTAL) に乗っており、低軌道衛星を追尾受信可能となっている。実習課

題 1 では、この中の屋上広帯域受信アンテナ系 (略称: SAT-ant-D) を使用して極軌道気象衛星 NOAA を追尾し、衛星から送信される UHF (1.7 GHz 帯) 1 周波数、および VHF (137 MHz 帯) 2 周波数の合計 3 周波数を同時に受信する。図 2.2 に使用する広帯域受信アンテナ系 (略称: SAT-ant-D) のブロックダイアグラムを示す。

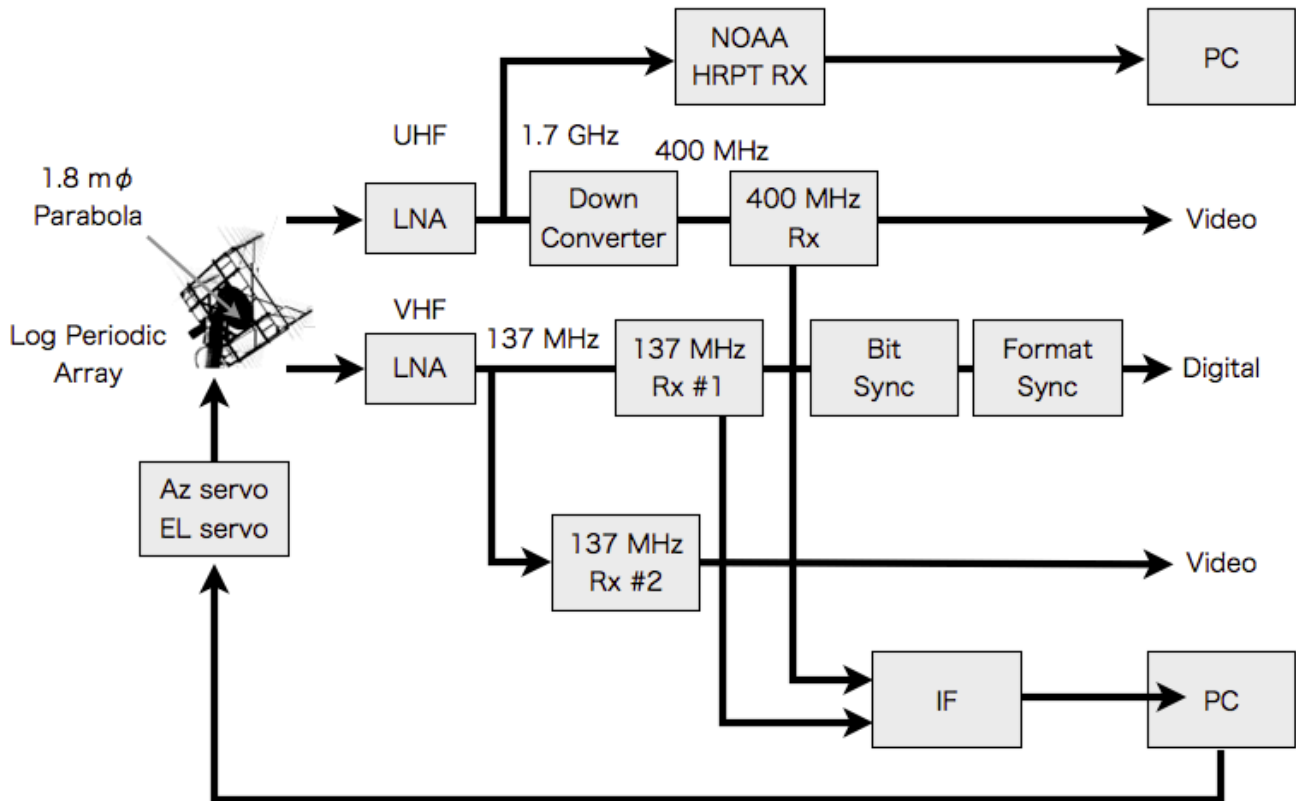


図 2.2 広帯域受信アンテナ系のブロックダイアグラム

2.2.2 衛星電波受信アンテナ部

屋上広帯域受信アンテナ系 (略称: SAT-ant-D) では、4 組の直交対数周期 (ログペリ) アンテナと 1.8 mφ パラボラアンテナを同架し、一つの駆動台 (ペDESTAL) で広帯域受信を行うことができる特徴を持っている。

2.2.3 アンテナ駆動部

極軌道気象衛星は、高度約 800 km を飛翔し、約 100 分で地球を一周する。よって、菅平から衛星が見える角度は時々刻々変化し、可視時間は長くても 15 分間である。特に菅平上空を通過する場合には、方位角および仰角が急速に変化する。このため、指向性の高い受信アンテナ系を高速にかつ正確に追従させる必要がある。屋上広帯域受信アンテナ系 (略称: SAT-ant-D) では、アンテナ駆動台の上部が仰角方向に水平から 90° まで動き、また駆動台下部が方位角方向に ±360° 動き、全角度範囲において高速追従を可能としている。この方式は、天体望遠鏡駆動台の場合、経緯台と呼ばれる。

2.2.4 衛星追尾受信システムコンソール

菅平宇宙電波観測所では、3 系統の追尾受信システムを有している。本実習では、このうちの一つの SAT-ant-D 系統 (図 2.2) を使用する。実習では、まず、軌道計算結果のデータを元に自動追尾動作をさせ、データ受信を行う。自動でアンテナが動き、特段の操作をせずとも安定して追尾を行うことができるので、主として受信に集中して操作実習を行う。

また、同時に NOAA 画像取得用受信機周波数設定と画像取り込みソフトウェア起動操作を行う。別の軌道で、軌道計算データを読みながら手動追尾を行い、アンテナ追尾速度および方向が時々刻々変化しその追尾誤差が大きくなると受信信号強度が下がり、場合によっては信号を見失うことを体感する。また、その追尾受信結果について、追尾受信ログを基に評価し、次の受信計画に活かすようにする。ここでは追尾受信システム詳細については記さないが、実際にコンソール（操作卓）の機器を見ながら手ほどきを受ければ容易に理解できる。実際にコンソール（図 2.3）の前に座って操作方法に習熟することを期待する。

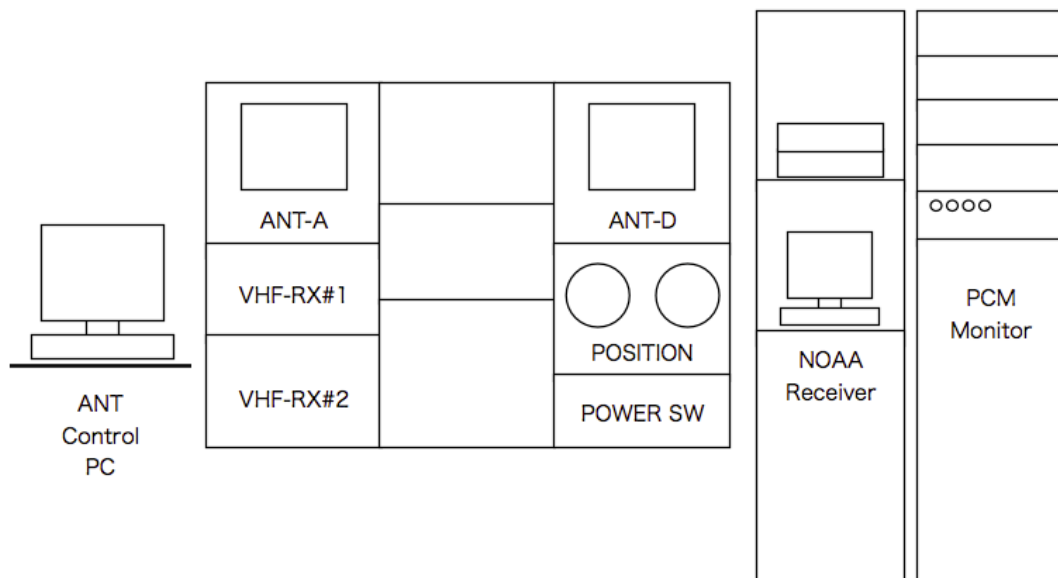


図 2.3 衛星追尾受信システムコンソール

2.3 NOAA 追尾操作

ここでは、プログラムによる自動追尾の流れについて解説する。自動追尾は、図 2.3 の一番左側にあるアンテナ制御パソコン (ANT Control PC) にインストールされている LabVIEW というソフトウェア上で開発された KEY_ANTverXG.vi というプログラムを用いる。このプログラムは、実習課題 1 の軌道計算によって生成した衛星の軌道情報が格納されたファイルを読み込み、そのデータに従ってアンテナを操作するという機能を持っている。以下、このプログラムの使用手順について述べる。

2.3.1 初期設定

初期設定確認

図 2.4 に示されている KEY_ANTverXG.vi のフロントパネルにおいて、初期設定タブをクリックして初期設定パネルを表示させる。この初期設定パネルにおいて、制御アンテナの選択において「ant-D」が選択されているかどうかをまず確認する。次いで、「テスト起動」、「デバックモード on」、「中間移動モードを強制的に抜ける」の全てがオフ（緑色ランプが点灯していない状態）になっていることを確認する。これらはすべて追尾受信システムの動作確認にのみ使用し、本実習では使用しない。

衛星追尾受信結果のファイル保存設定

本実習の衛星追尾受信操作記録を残すため、図 2.5 の初期設定タブを選択する。ファイル保存のフォルダをクリックし、保存フォルダ（図 2.6 の場合は log フォルダ）まで進み、ログを残したいフォルダをクリックする。

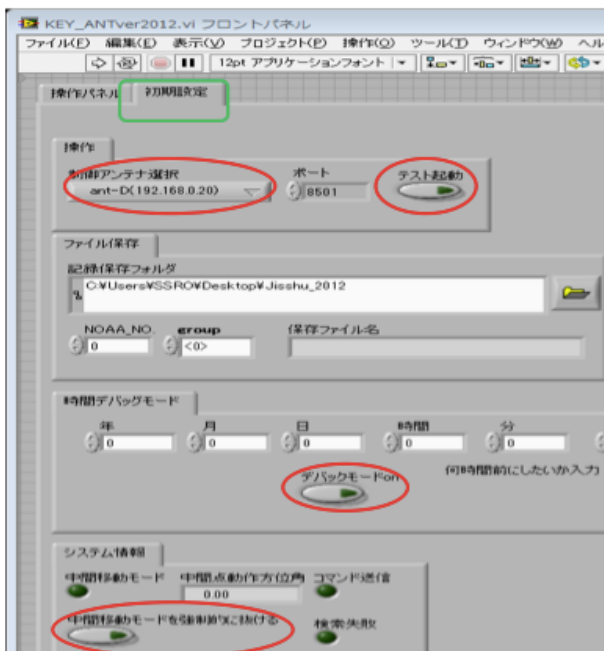


図 2.4 KEY_ANTverXG.vi の初期設定パネル

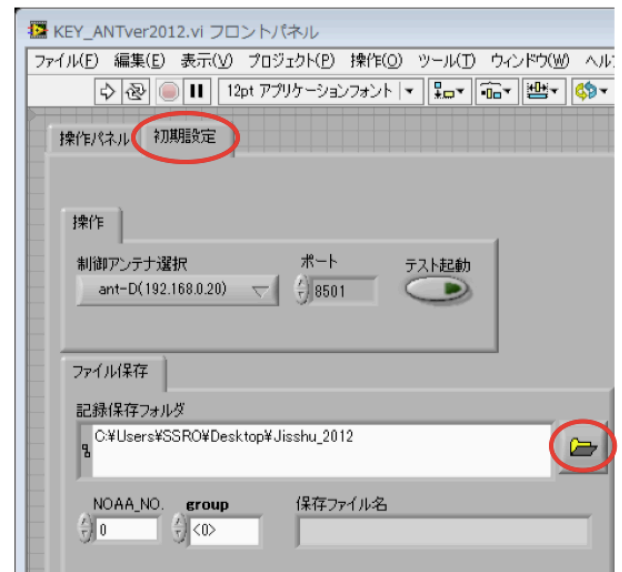


図 2.5 可視軌道ファイルの入っているフォルダの指定

次に、図 2.7 のように、追尾する NOAA 衛星の番号とグループ番号を選択し、さらに出力ファイル名を入力する。

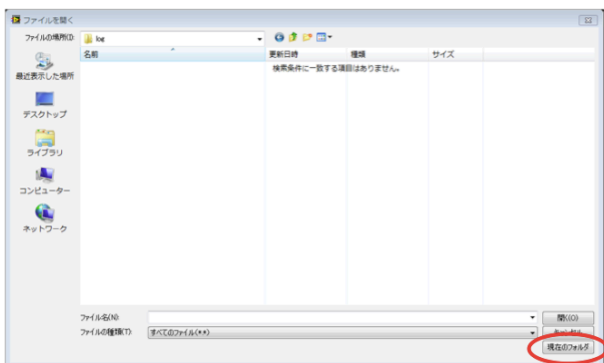


図 2.6 出力ファイル保存フォルダの選択

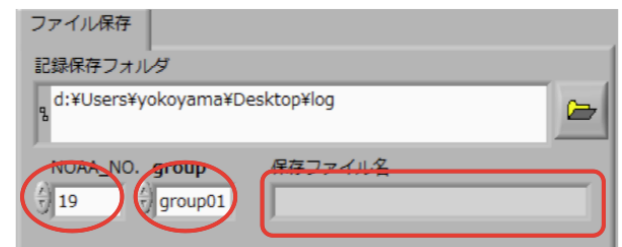


図 2.7 衛星番号、グループ番号、保存ファイル名設定

2.3.2 可視軌道ファイルの作成 - 軌道計算実習において

実習課題 1 の衛星軌道計算において、各グループの追尾予定に従い以下のようにパラメータを設定し、可視軌道ファイル (PLROBD.DAT) を作成する。追尾する衛星に合わせて軌道パラメータファイル (ELNOAA ○○.dat) を以下のことを考慮して修正し (ここで ○○ は NOAA 衛星の番号)、

- 計算開始時刻: 予測入感時間 (AOS) より 10 分程度前の時刻に設定する
- 計算終了時刻: 予測消感時刻 (LOS) より 10 分程度前の時刻に設定する
- 計算間隔: 追尾間隔 1 秒に設定する。

軌道計算プログラムを走らせて計算する。衛星の自動追尾プログラムには、PLROBD.DAT を読み込ませることになる。

2.3.3 可視軌道ファイルの読み込み

図 2.8 の操作パネルタブをクリックして、操作パネルに切り換える。軌道計算実習時に作成した可視軌道ファイル (.OBD) を各グループの USB メモリスティックに記録して持参し、追尾操作パソコンに取り込む。まず、図 2.8 で赤い丸で示されているフォルダアイコンをクリックし、参照フォルダを指定する。次に、表示された軌道ファイル名リストから、使用するファイルを指定する。ここで指定したファイル名が、図 2.9 の衛星軌道ファイルに表示されていることを確認する。このとき、軌道ファイル読み込みが緑点灯になっており、残りのボタンはすべて点灯していないことを確認する。

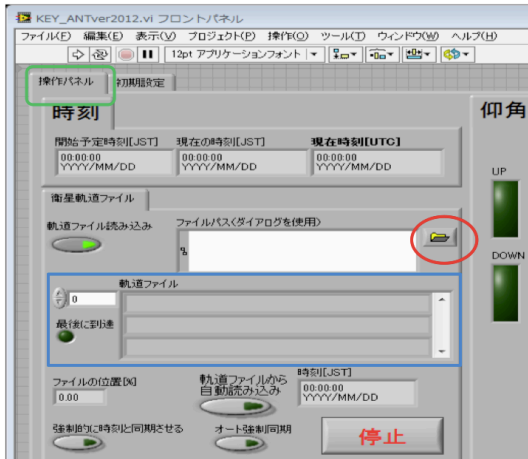


図 2.8 可視軌道ファイルのフォルダを指定

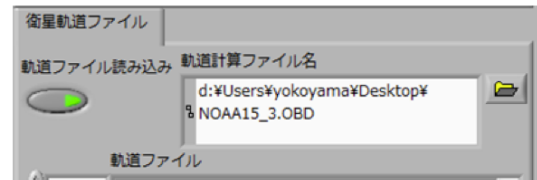


図 2.9 軌道計算ファイル名の確認

2.3.4 追尾開始準備

追尾を始める前に、追尾開始時刻を確認しておく必要がある。図 2.10 の操作パネルタブをクリックして操作パネルを表示させ、実行ボタンをクリックする。そうすると開始時刻と現在時刻が表示されるので、スケジュール表と合っているかを確認する。もし、違っていた場合は、プログラムを停止させ、軌道計算パラメータを再度修正した後、ファイル指定操作をやり直す。

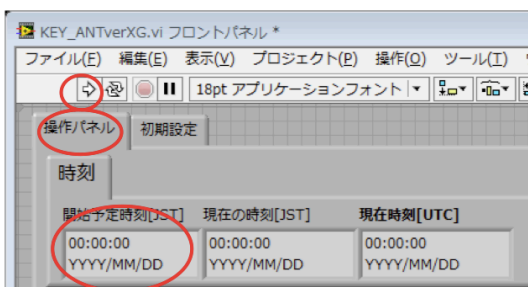


図 2.10 実行ボタンと追尾開始時刻確認



図 2.11 衛星追尾時のアンテナ制御パネル

2.3.5 追尾開始

開始予定時刻まで無為に過ごすのではなく、追尾受信システムの動作を確認し、追尾準備の最終確認を行うことが大事である。開始時刻になったときに、図 2.11 に表示される実際の仰角および方位角が、軌道ファイルから読み込まれた仰角および方位角となることを確認する。もし、アンテナリミットにより、予定方向に合っていない場合は、上: 仰角 UP ,

下: 仰角 DOWN, 右: 方位角 RIGHT, 左: 方位角 LEFT をクリックして, リミットの反対方向に動かして予定方向に合わせる。衛星が可視になると設定仰角がプラスになり、実際のアンテナ仰角がプラスに動き出すことを確認する。追尾中はアンテナの仰角と方位角が 1 秒ごとに変化していることを確認する。もし、追尾中にアンテナリミットにより動作が止まった場合は、タッチパネルから強制的にアンテナ方向を切り換える (この方法は無理をすると追尾装置を壊してしまうので、指導者に確認の上、慎重に行うこと)。

2.3.6 追尾終了確認

可視軌道ファイルの最後に到達した場合、図 2.12 の「最後に到達」のランプが点灯し、追尾プログラムが終了する。

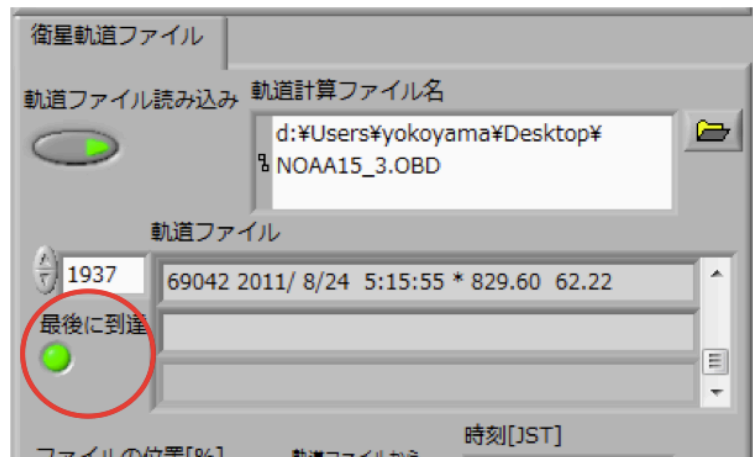


図 2.12 追尾終了時のフロントパネルの状態

2.3.7 異常時の対応

プログラムが正常に終了しなかったり、追尾動作が異常となった場合、図 2.13 の操作パネルの停止ボタンをクリックして、プログラムを終了させる。それでも止まらない場合は、図 2.14 の強制終了ボタンをクリックする。

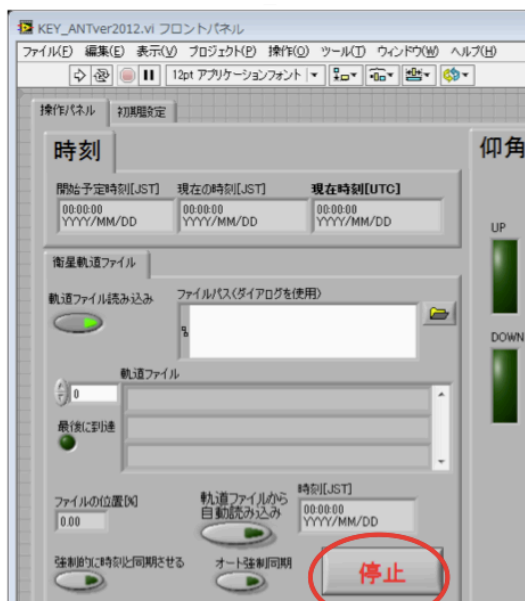


図 2.13 プログラムの停止ボタン

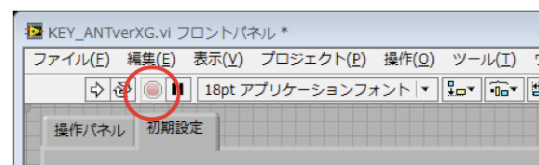


図 2.14 プログラムの強制終了ボタン

2.4 NOAA 衛星気象画像データの取得

画像データ取得開始操作

受信した気象画像データは、運用卓 (コンソール) 横に設置されたコンピュータのハードディスクに随時格納される。受信する衛星が接近してきた段階で、アプリケーションから、Receive → Receive Image を選択 (ポップアップしていない時は、画面上の過去の取得ファイルを消す) しておく必要がある。

画像データの種類

データが受信されると、New Image ***** 2006[CH *] というような名前のファイルが画面に現れる。CH の後ろは “見ている” 電磁波の波長の違いを表す。画像の上あたりに 1 から 5 の四角いボタンがある。それぞれの番号は、以下のような波長の違いを表している。

- チャンネル 1: 可視画像 (波長 $0.58\ \mu\text{m}$ - $0.68\ \mu\text{m}$)
- チャンネル 3: $3.8\ \mu\text{m}$ 画像 (波長 $3.55\ \mu\text{m}$ - $3.93\ \mu\text{m}$ 、ただし NOAA 15 だけ別の波長)
- チャンネル 4: 赤外画像 (波長 $10.5\ \mu\text{m}$ - $11.5\ \mu\text{m}$)

画像データ取得の終了

画面上部の × 印を押すと、Reception Complete となってデータ取得が完了する。

以下に NOAA 衛星で受信された画像の例を示す。

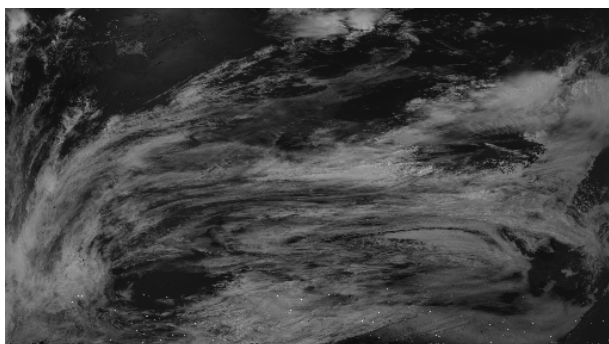


図 2.15 NOAA 衛星気象画像 (CH1: 可視波長域)

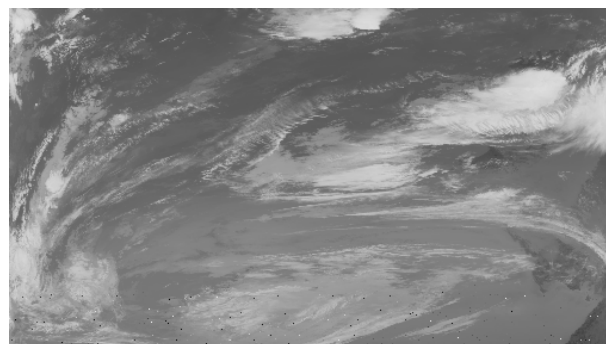


図 2.16 NOAA 衛星気象画像 (CH4: 赤外波長域)



図 2.17 NOAA 衛星気象画像 (CH3: $3.8\ \mu\text{m}$)

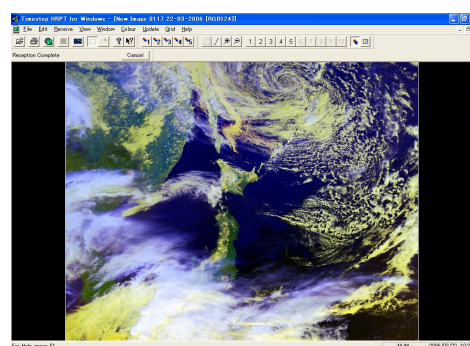


図 2.18 NOAA 衛星疑似カラー画像

2.5 実習課題

1. 追尾受信の計画およびログ (受信衛星名、受信開始の時刻・方位角、受信終了時刻・方位角、可視時間、最大仰角およびその時の方位角、ひまわり受信画像の軌道位置プロット、操作確認責任者および班員の配置、追尾開始前の設定確認、追尾終了後の設定確認、追尾受信結果の評価、引き継ぎ事項) を作成せよ。
2. 追尾受信ログデータのプロットを基に、各グループの自動追尾および手動追尾が予定通り実施できたかを評価せよ。
3. 追尾受信ログ数値データ (アンテナ方位角・仰角、受信電界強度、ドップラシフト) が軌道計算によって予測されたものとどの程度一致しているかを定量的に評価せよ。この評価は自動追尾のパスについてのみ行えば良い。

MEMO

実習課題 3

極軌道衛星と静止軌道衛星の画像データ分析実習

目的

取得した可視や赤外などのデジタル画像データから、電磁波の波長により“見える”現象が異なることを理解する。

3.1 方法

この実習では、アンテナを操作して受信した NOAA 衛星からのデータに加えて、静止軌道高度からほぼ同時に得られたデータを用いて、可視と赤外の波長がとらえている気象現象を分析する。なお、静止軌道衛星のデータは、自動で連続的に取得されてハードディスクに格納されており、そのデータファイルを用いる。

3.2 NOAA 衛星受信データの分析

衛星画像を表示するアプリケーション WinHRPT が立ち上がっていることを確認して、自分たちが受信したデータファイル呼び出す。ファイル名は、取得日時を表す New Image 0050 06-09-2012 の形である。再度、以下を確認しておくこと。

- チャンネル 1: 可視画像 (波長 $0.58\ \mu\text{m}$ - $0.68\ \mu\text{m}$)
 - チャンネル 3: $3.8\ \mu$ 画像 (波長 $3.55\ \mu\text{m}$ - $3.93\ \mu\text{m}$ 、ただし NOAA 15 だけ別の波長)
 - チャンネル 4: 赤外画像 (波長 $10.5\ \mu\text{m}$ - $11.5\ \mu\text{m}$)
- ❶ 画面にチャンネル 4 (赤外) の画像が現れる。ボタン 1 をクリックすると可視画像が現れる。
 - ❷ 画像のカラー表示も可能である。それらしいボタンをクリックしてみよ。あとで述べるように、保存して解析するデータは白黒のものである。
 - ❸ カラー表示を見ながら、日本列島が衛星視野のどのあたりにはいるかをメモせよ。例えば左下 4 分の 1 など。
 - ❹ チャンネル 4 (赤外) とチャンネル 1 (可視) のデータを比較。チャンネル 4 の画像では明確ではないが、チャンネル 1 でははっきりと見える雲領域を見つけ、日本列島に対してどのような位置にあるかを記録せよ。広い領域がよい。この領域の分析が本実習のレポート課題となる。詳細は 3.4 にて。
 - ❺ Window から Save contents をクリックして画像を保存する。上に述べた 2 つのチャンネルを白黒データにして保存せよ。画像ファイルの画面のサイズを変更せずに 2 つのファイルを保存すること。現れたウィンドウが保存する画像に重なっていないことにも注意せよ。ファイル名は、衛星名、チャンネル、取得時間 (世界時で何時何分)、班番号がわかるものとせよ。

- ⑥ 2つのファイルをサーバーにアップロード。ファイルを右クリックし、「送る」から upload-group ○ を選択。○の部分は班番号。ここでアップロードした画像ファイルは、実習課題4で用いる。

3.3 静止軌道衛星ひまわり受信データの分析

同じコンピュータで静止軌道衛星ひまわりの画像を表示する。NOAA 衛星とほぼ同時に取得された赤外データをアプリケーションから開いて分析する。

- ① アプリケーションからファイルを開く前に、レポート課題のためにファイルをアップロードしておく。そのためにまず、デスクトップの bitmap_buffer のフォルダをクリック。
- ② IMG_PS01IR1_2012mmddhhff の形のデータを探す。PS01IR1 は赤外のデータであることを示す。2012 の次の mm, dd, hh, ff は、それぞれ月、日、時間、分である。09061120 などとなる。この時間は世界標準時であり、日本の地方時より **9時間** 遅れる。自分のグループの NOAA 衛星データの取得時間に最も近い時間のデータを取り上げよ。
- ③ 画面に図が現れる。レポートのために、このビットマップデータをサーバーにアップロード。
- ④ これ以降がアプリケーションでの処理になる。ViewLRIT アプリケーションが立ち上がっていることを確認して、「ファイル」、「開く」、「PS01IR1 のフォルダー」を順に指定し、② で取り上げたファイルと同じ名前のファイルを探してそれを開く。
- ⑤ 画像に加えて、その横に雲の高さも表示される。「表示」から「カラー」を選べと画像が色づけされる。
- ⑥ 3.2 で得た極軌道衛星の視野をこの図で確認せよ。また、同じく 3.2 で見出した雲領域の場所もこの図で確認せよ。この領域は、この赤外データでも “暗い” ことが期待される。
- ⑦ その領域の真ん中付近を横切るような線に沿って雲の高さ（雲頂高度）分布を調べてみよ。「雲頂高度グラフ」を選んで「開始」を指定。取り上げた領域の「雲頂高度」はまわりに比べてどうなっているかを調べよ。結果をプリントスクリーンで保存せよ。後ろの 4.2 のコラム参照。

★ データのアップロード

USB メモリなどを持参している人はそのメモリ経由で画像を家に持ち帰るとよい。そのようなメディアを持ってきていない人は、自分のものとわかる名前で保存したファイルを宇宙通信工学用のデータ保存サーバーへアップロードしておき、自宅からダウンロードすることができる（**但し、他のメンバーもそのファイルを自由にダウンロードできてしまう**）。

アップロードしたいファイルを右クリックし、「送る」から upload-group ○ を選択。○の部分は班番号。

自宅から以下のアドレスにアクセスしダウンロードできる: <http://gwave.ice.uec.ac.jp/~sce/>。

3.4 実習課題

NOAA 極軌道衛星によって赤外波長 (10.5 - 11.5 μm) と可視波長の電磁波で取得されたデータを比較すると、赤外波長では見えにくい可視波長では顕著に見える領域が存在することがわかった。NOAA 衛星と同時に取得されている静止軌道衛星ひまわりの赤外波長の雲頂高度の分析をもとに、その雲領域の意味するところを考察せよ。また、考察結果を裏付ける証拠についても言及せよ。

レポートでは、2 つの波長で取得した NOAA の画像データの図、静止軌道の画像データの図を含む 3 つ以上のファイルを取り込み (糊できれいに貼り付けてもよい) 印刷して提出せよ。それぞれの図で取り上げた領域を示しながら、考察結果を書くこと。画像データは適宜縮小し、A4 の紙 1 枚のレポートにすること。

★ 参考：静止軌道気象衛星：ひまわり (MTSAT-1R)

「ひまわり」の愛称で知られる日本の静止気象衛星「GMS」シリーズは、宇宙からの気象観測を目的に東経 140 度の静止軌道上に配置された衛星である。衛星から送られる地球雲画像の観測データは、テレビ、新聞等の天気予報を始め、さまざまな分野で利用され、日常生活にもなじみ深いものとなってきた。最初の GMS は 1977 年に米国から打ち上げられたが、続く GMS-2 以降は種子島宇宙センターからの打上げとなり、GMS-3、4、5 と運用が引き継がれてきた。後継機の運輸多目的衛星 (MTSAT-1) が打ち上げに失敗したため、GMS-5 (ひまわり 5 号) は、衛星寿命の 5 年を超えて観測を続けてきたが、2003 年 5 月 22 日からは、米国の GOES 9 による代替運用が開始された。2005 年 2 月 26 日に、MTSAT-1R の打ち上げが成功し、2005 年 3 月 8 日に静止軌道へ投入された後、「ひまわり 6 号」という愛称がつけられた。2005 年 6 月 28 日から気象衛星として正式に運用が開始された。今回受信を行う MTSAT-1R は静止軌道上東経 140 度に位置している。図 3.1 は、菅平宇宙電波観測所から見た静止軌道衛星の方位角・仰角図であるが、東経 140 度に位置する MTSAT-1R は、ほぼ真南の方向、仰角約 47 度の位置にあることがわかる。

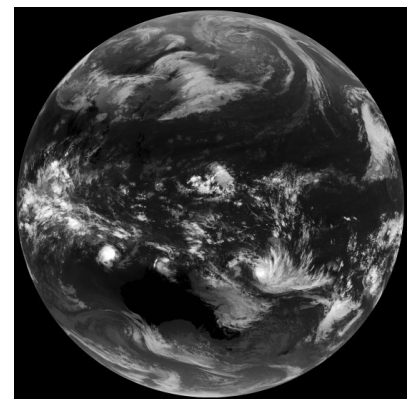
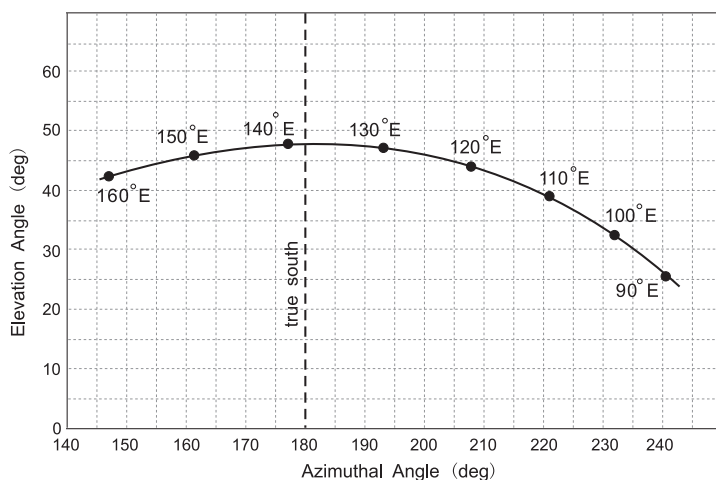


図 3.1 菅平宇宙電波観測所から見た静止軌道衛星の方位角・仰角図

図 3.2 ひまわり 6 号全球可視画像

実習課題 4

プログラミング言語 IDL を用いた画像処理の実習

目的

取得した 2 つのデジタル気象画像を用いて画像処理の「類似度」の概念を理解する。

4.1 方法

IDL というプログラミング言語を用いる。このプログラミング言語に関する特段の予備知識なしに課題が進められるような環境を用意している。

4.2 具体的なコンピュータ処理

まず、各班でアップロードしてある可視と赤外の画像ファイルを以下のアドレスからダウンロードして、デスクトップにある班別のフォルダに入れる。

<http://gwave.ice.uec.ac.jp/~sce/>

次に、IDL の ❶ 起動、❷ 画像読み込み、❸ 疑似カラー表示、❹ ある断面で切った画像濃度値のプロット、❺ 画像の濃度値の総和、❻ 画像の類似度 (相関係数) の算出、❼ 2 次元配列の等高線表示、❽ 配列の切り出し、❾ 繰り返し処理、❿ 画面の消去、の各処理を以下に沿って行う。これらの処理をうまく組み合わせると実習課題ができる。

❶ IDL の起動

デスクトップの IDL というアイコンをダブルクリックすれば、実行画面が立ち上がる。最下部の IDL> と書いてある部分にコマンドを入力して処理を進めていく。

❷ 画像読み込み

例えば、sample_visible.bmp というファイルの画像を vis という配列に読み込みたい場合は以下を実行。

```
IDL > read_image, vis
```

ファイルを選択するダイアログが出てくるので、適宜フォルダを移動するなどして、目的のファイルを選択。同様の手順で、他の画像についても任意の配列 (配列の名前は何でもよい) に読み込ませることが可能。

```
IDL > read_image, ir
IDL > read_image, micro
```

③ イメージの疑似カラー表示

vis, ir, micro などの配列に読み込んだイメージデータを疑似カラーで表示するには以下を実行。

```
IDL > plot_image, vis
```

vis, ir, micro 等の表示したい配列を指定する。疑似カラーの色を変える場合は、以下のコマンドを実行。

```
IDL > loadct, 1
```

1 は黒から青を経由して白へ変わっていくカラーテーブル。カラーテーブルを示す番号は 0 から 39 まで指定可能。1、3、5、39 番あたりがおすすめ。画像にタイトルを付ける場合は以下のようにする。

```
IDL > plot_image, vis, title='visible'
```

タイトルをクォーテーションで囲んで指定。ここでは可視を意味する visible をタイトルとしてつけている。出力される画像は図 4.1 のようになる (この例では、39 番のカラーテーブルを使っている)。

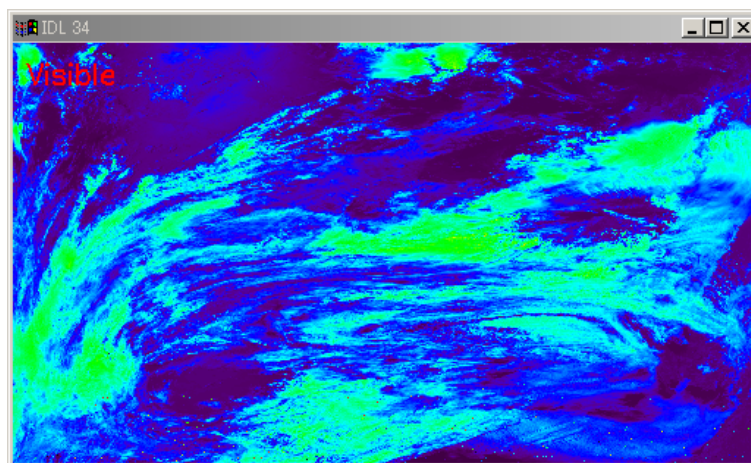


図 4.1 可視画像をカラーテーブル 39 番でプロットしたもの

④ ある断面で切った画像のラインプロット作成

このアプリケーションでの画像は、左下隅を (0,0) の場所として、右に M 画素目、上に N 画素目の位置を (M-1, N-1) と表す。例えば、vis という配列に読み込んだ画像を、左から 101 画素目である 100 の位置で縦方向に切り取ってラインプロットするには以下を実行する。もともとの 2045 × 5751 の画素がいくつに変わっているかを確認すること。

```
IDL > slice_image, vis, x=100
```

100 の位置で横向きに切り取って表示するには以下を実行。

```
IDL > slice_image, vis, y=100
```

この上に他の画像の断面を重ね書きした場合は以下のように /over というキーワードを付けるとよい。

```
IDL > slice_image, ir, y=100, /over, col=250
```

以下で示した例 (図 4.2) では、 $y=100$ における可視画像のスライスの上に、赤外の $y=100$ のスライスを赤 (col=250) で重ね書きしている。ここで指定するカラーは 0 から 254 まで指定できる。0 (黒) から始まり、紫・青・緑・黄を経て虹と同じ順番で 254 (赤) まで用いることができる。

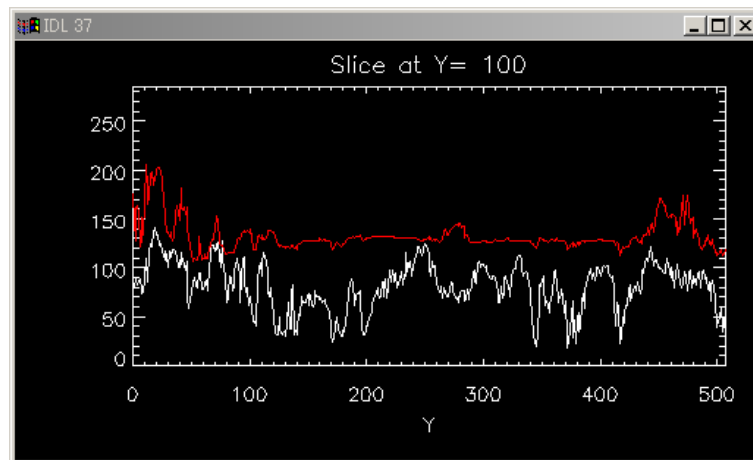


図 4.2 $y=100$ における可視画像のスライスの上に、赤外のスライスを赤 (col=250) で重ね書きしたもの

可視画像と赤外画像で「底」の値が必ずしも同じでないことに注意しよう。画像のパタンの比較を行う場合には、絶対値よりも形状に注目するので、それぞれの平均値を引いた量を用いると類似性や相違がはっきりわかる。

⑥ 画像の濃度分布の平均値を求める

例えば、vis という配列に読み込んだ可視画像の各要素の濃度の総和を s という値に入れるには以下のようにする。

```
IDL > s=total(vis)
```

平均値として入れるには、右辺を全画素数で割ればよい。画素数は 2 つ数字の積になるが、どちらかの数字に、286. のように小数点をつけること。これは、単にこのアプリケーションの特性である。求めた値は、

```
IDL > print, s
```

とタイプすればわかる。

⑥ 2 つの画像の類似度 (相関係数) を算出する

2 つの画像分布を $f(i, j)$, $g(i, j)$ とすると、相関係数 R は以下で与えられる。

$$R = \frac{\sum_{j=0}^{N-1} \sum_{i=0}^{M-1} (f(i, j) - \bar{f})(g(i, j) - \bar{g})}{\sqrt{\sum_{j=0}^{N-1} \sum_{i=0}^{M-1} (f(i, j) - \bar{f})^2} \sqrt{\sum_{j=0}^{N-1} \sum_{i=0}^{M-1} (g(i, j) - \bar{g})^2}} \quad (4.1)$$

ここで $\bar{f}$ と $\bar{g}$ は、それぞれ f と g の平均値を表している。

このソフトウェアでは、 a の平方根は sqrt(a) で表せる。 f と g が同一であれば、相関係数が 1 になることを実際に画像を使って確かめよ。可視画像、赤外画像のどちらか一方を使って確認せよ。課題に直結するので必ず行うこと。

⑦ 2次元配列の等高線 (コンター) 表示

例えば、vis という 2 次元配列に入ってる量を最大値 1 に規格化して表示したいときは以下を連続して実行。

```
IDL > contour, 1.*vis/max(vis), levels=[0.2,0.6,0.8], /fill  
IDL > contour, 1.*vis/max(vis), levels=[0.2,0.6,0.8], /follow, /overplot
```

配列の前に 1. をかけているのは単にこのアプリケーションの特性である。

⑧ 配列の切り出し

例えば、vis の x 座標 5 から 20、y 座標 10 から 25 までの 256 個を切り出して、新しい配列にするときは以下を実行。

```
IDL > vis_temp = vis(5:20,10:25)
```

⑨ 繰り返し処理

例えば、vis の画像の切り出し領域を x 方向に変えながら、その領域の画像の濃度の総和 s を出力させるときは以下を実行。

```
IDL > for i = 5, 30 do begin & $  
IDL > vis_temp = vis(i+15, 10:25) & $  
IDL > s = total(vis_temp) & $  
IDL > print, s & $  
IDL > endfor
```

for と endfor の間に入れた処理が繰り返される。アンド記号とドル記号は改行しても命令がつながっていることを表す。このアプリケーション固有のものである。この例で、for i=5,30 do begin とあるのは、5 から 30 まで i が 1 ずつ増えるようなループを意味する。実際の画像サイズに合わせて、ループの開始・終了 (例では、5 と 30) を変更すること。また、このループを 2 重に用いる場合には、以下のように \$ 記号を除いて 1 行で書く必要があることにも注意する。

```
IDL > for i = 5, 30 do begin & vis_temp = vis(i+15, 10:25) &  
s = total(vis_temp) & print, s & endfor & endfor
```

⑩ 画面を消す

ウインドウが多くて邪魔になってきた時は以下のコマンドで消すことができる。

```
IDL > dw
```

★ データの保存

ウィンドウに表示された画像を bmp、jpg などの形式で保存する。

bmp 形式の場合: ウィンドウをマウスでアクティブにしてから `PrintScreen` ボタンを押す。

jpg 形式の場合: ウィンドウをマウスでアクティブにしてから `Alt + PrintScreen` を押す。

どちらの場合も保存するファイル名を尋ねるダイアログが出てくるので、それぞれ自分のファイルと分かるようなファイル名で保存する、保存する場所はデスクトップで構わない。

4.3 実習課題

以下の課題を行え。画像を適宜縮小するなどして、A4 の紙 2 枚以内のレポートにすること。

- ① 可視と赤外画像の対応する場所の 16×16 のデータで相関係数を求める処理を画像全域に対して行った結果をコンタープロットとして表示し、実習課題 3 で取り上げた雲領域に注目して、プロットが示していることを考察せよ。画像全域に対して処理を行うということは、 16×16 の "window" を x 方向に 1 ずつ、または y 方向に 1 ずつずらしていくことを意味する。図を見やすくするため contour では `levels = [-0.8, -0.4, 0.0, 0.4, 0.8]` を用いること。色は自由。

- ② 自由課題 (レポートの 3 枚目として以下でつくった program ファイルを付けよ)

打ち込んだ処理をファイルに書き出して保存しておく、後で自動で走らせることが可能である。unix の typescript に似た機能として、`journal` コマンドがある。ある段階以降の処理をすべて保存したいときには、

```
IDL > journal, 'jibun-no-namae.pro'
```

のように打ち込んでから処理を進める。名前は自由だが、拡張子は `pro`。記録を終えたいときには、引数なしで

```
IDL > journal
```

とするとよい。名付けたファイルがデスクトップの `image-proc` のフォルダーの中にできている。ワードパッドなどのエディターで開き、**最後の行に `end` を書き加えて** から保存せよ。その後、

```
IDL > .run jibun-no-namae.pro
```

とすれば、プログラムとして一連の処理が自動で行われる。なお、`image-proc` のフォルダーの中に多くの類似したファイルができるのを避けるため、自分が作ったファイルは各自のメディアスティックなどに移動し、そのフォルダーから削除しておくこと。

実習課題 5

放送衛星受信実習

目的

静止軌道上の放送衛星からの電波を受信し、アンテナの指向性、および放送衛星システムの信号の仕組みを理解する。

5.1 放送衛星概論

放送衛星は、地上から送信 (アップリンク: UL) した電波を約 5 万 km 離れた静止軌道上で受信し、それを放送周波数に変換して電力増幅し、ほぼ同じ距離離れた地域に向けて再送信する (ダウンリンク: DL)。この中継器 (トランスポンダ) 機能は通信衛星と同じである。通信衛星との違いは、大きな送信電力、使用する周波数帯区分、カバーする地域の広さ、衛星所有者と送信局免許が異なる場合があるなどである。

通信衛星では、C バンド (UL 6 GHz / DL 4 GHz) や Ka バンド (UL 30 GHz / DL 20 GHz) などがよく用いられるが、放送衛星では主に Ku バンド (UL 14 GHz / DL 12 GHz) が用いられる。ただし、Ku バンドは降雨減衰が著しいため、赤道地域では降雨減衰が少ない S バンド (2.6 GHz) 帯が利用されることもある。また、南北アメリカやヨーロッパでは、C バンドを用いた微弱な通信衛星中継電波を大口径アンテナで直接受信する方法も用いられている。しかし、日本のような密集地での戸別受信では、使用できるアンテナの大きさに制約があるため、小口径アンテナで利得が得やすい Ku バンドの直接放送が行われることが多い。しかし、Ku バンド直接放送の場合、小口径アンテナで十分な受信 S/N を得るために、衛星放送電力に 100-200 W という高出力が要求されることから、衛星側に大きな負担がかかりやすい。

静止衛星からの可視範囲はおおむね地球の半分程度であるが、特定の通信事業者間の通信に限られる衛星通信では、双方向に指向性の高いアンテナを使い、不要地域への漏洩を低減させる。しかし、不特定多数の視聴者が受信する直接放送衛星においては、衛星送信アンテナの指向性を広くしなければならないため、地域限定放送であっても近接地域にも電波が送信されてしまうことが問題になる。こうした近隣の国に対するダウンリンク漏洩 (スピルオーバー) を政治的・文化的事情から厳しく制限する必要がある。日本の放送衛星では、日本列島の形状に合わせた指向性を持たせながらスピルオーバーを最小限に抑制するため、衛星アンテナ特性に工夫が凝らされている。

日本では、放送衛星は放送事業者、通信衛星は通信事業者と所有者が異なり、その運用目的もそれぞれの業務に限定されていたが、1989 年の放送法改正により、通信事業者も受託放送事業者として通信衛星を用いた放送ができるようになった。日本では BSAT 衛星によって NHK と民間放送事業者が共同で運用を行っている。放送衛星では、2011 年 7 月 24 日まで アナログ放送とデジタル放送が並行して行われてきたが、アナログ放送が終了し、さらに新しい局が追加され、現在 BS1-23 のチャンネル全てで放送されている。この実習では、BS 放送電波の到来方向決定、放送電波スペクトル測定、および BS と同じ位置から送信されている通信衛星 (CS) 受信確認を行うことにより、衛星放送の特徴の理解を目指す。

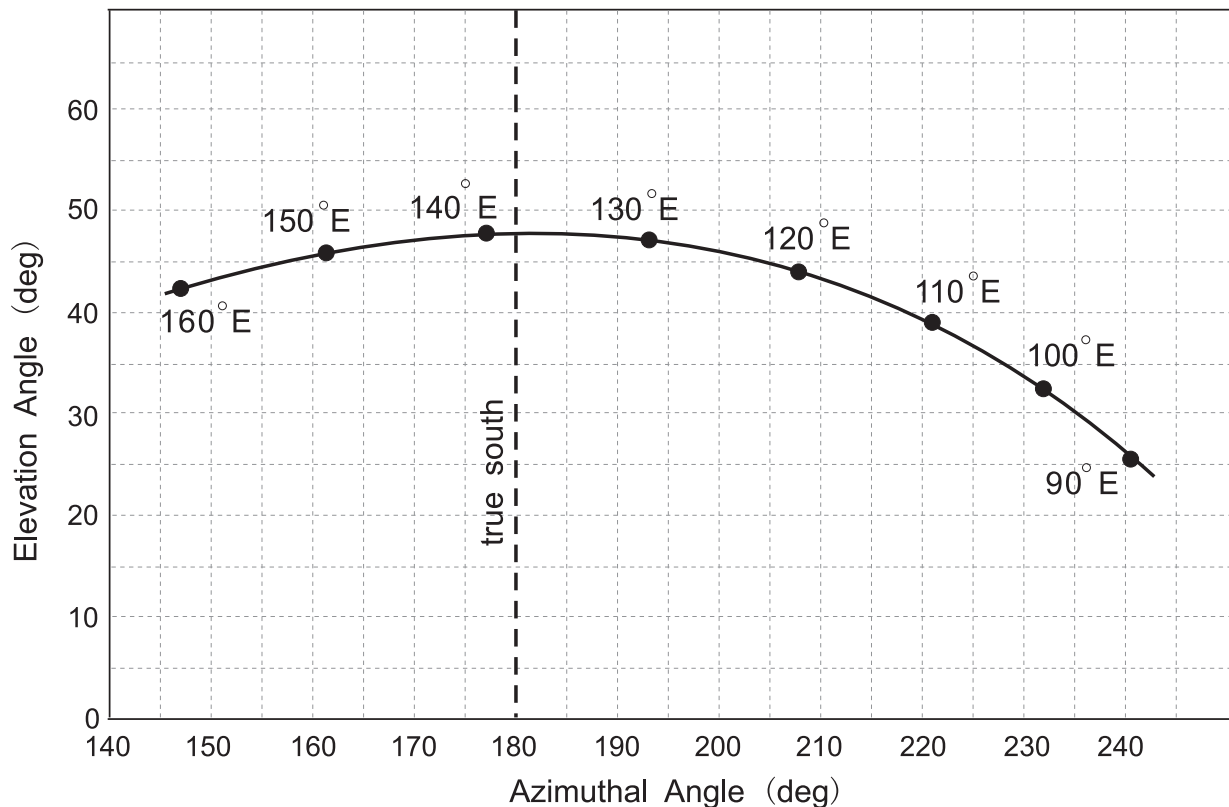


図 5.1 菅平宇宙電波観測所から見た静止軌道衛星の方位角・仰角図

5.2 静止衛星方向の決定

BS 電波受信を行うためには、静止軌道上の衛星の位置をもとにして、菅平宇宙電波観測所からどの方向に衛星があるのかを正確に把握する必要がある。図 5.1 は、菅平宇宙電波観測所 (北緯 36.517°、東経 138.317°、海拔高度 1313 m) から見た静止軌道衛星の方位角および仰角を表したものである。この実習では、近接した静止軌道位置にある BS および CS の電波を受信するので、衛星方向は同一と見なしてよい。BS 静止位置は東経 110° であるので、図 5.1 より、菅平から仰角 A 度、方位角 B 度の位置にあることが分かる。ただし、図 5.1 において、方位角は真北から東回りに取っていることに注意する。実際の指向方向決定手順では、地磁気北方向を基準に方向を決定する。菅平では地磁気偏角 (地理的真北を基準にした方位磁針方向のずれ) は真北より西に 7° 傾いている。この地磁気偏角を考慮すると、磁北方向を基準にした方位角は、 $C = B + 7$ 度となる。まず、図 5.1 から BS および CS 方向について A, B, C の値を求めよ。

5.3 使用機器

以下の機器を図 5.2 のように接続する。また、実習にはトランシーバ 2 台 (YAESU FTH-105D) および、磁気コンパス、モンキースパナ、プラスドライバを用いる。

- オフセット型パラボラアンテナ: SONY BS アンテナ SAN-37K2SET
- デジタルテレビチューナ: I-O data HVT-BCT300
- ビデオディスプレイ: SONY トリニトロンカラーテレビ KV-32FW3
- スペクトラムアナライザ: ADVANTEST TR4131

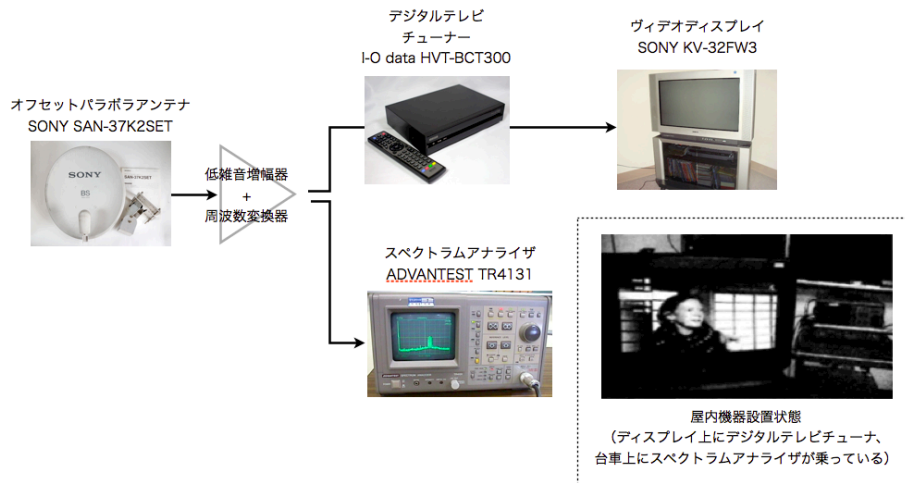


図 5.2 BS 受信実習機器全体接続図

5.4 BS アンテナ指向方向決定手順

5.4.1 準備

- ❶ リモコンの「電源」ボタンを押して、デジタルテレビチューナの電源を ON にする (表示ランプが青色になる)。
- ❷ リモコンの「テレビ電源」ボタンを押して、テレビの電源を ON にする (テレビ画面が表示される)。
- ❸ テレビ画面が表示されない場合は、デジタルテレビチューナ設定で、BS コンバータ用電源を「入」にする (作業開始時には、衛星受信可能な状態に設定されていることが前提である)。
- ❹ 図 5.3 の BS アンテナ方位角固定ボルトを固定しているナットを、図 5.4 の矢印のように方位角方向の回転がスムーズになる程度にモンキースパナを使って緩める (アンテナ方向が不安定になるほど緩めないように注意)。
- ❺ 実習のため、方位角方向を一度大きくずらす。

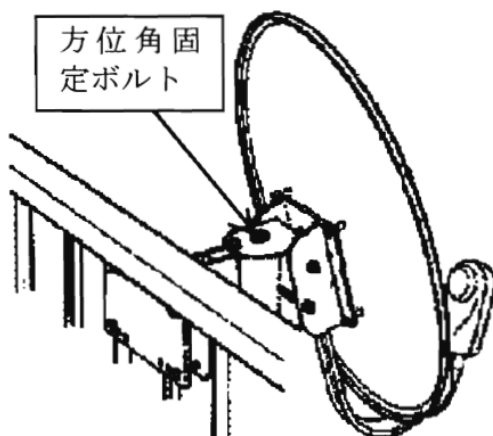


図 5.3 方位角固定ボルトの位置

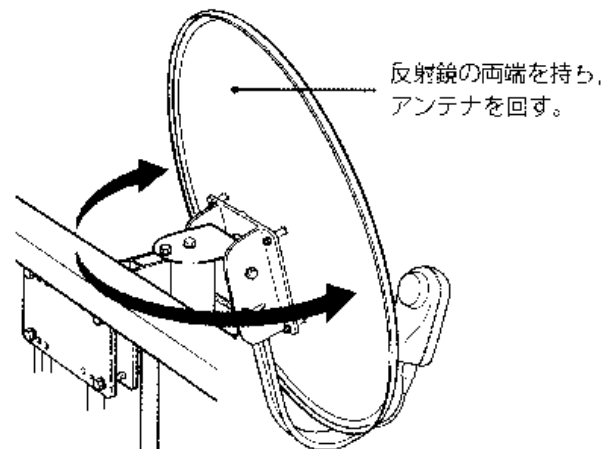


図 5.4 方位角設定方法

- ⑥ 図 5.5 の BS アンテナ仰角固定ボルトをプラスドライバーで押さえながら、モンキースパナでナットを緩める。ただし、アンテナ仰角が固定できなくなるほど緩めないように注意する。
- ⑦ 図 5.5 の矢印の方向に仰角方向を一度大きくずらす。

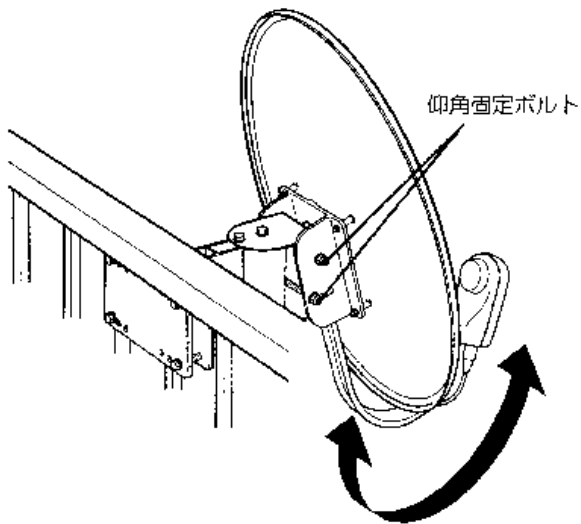


図 5.5 仰角固定ボルト位置

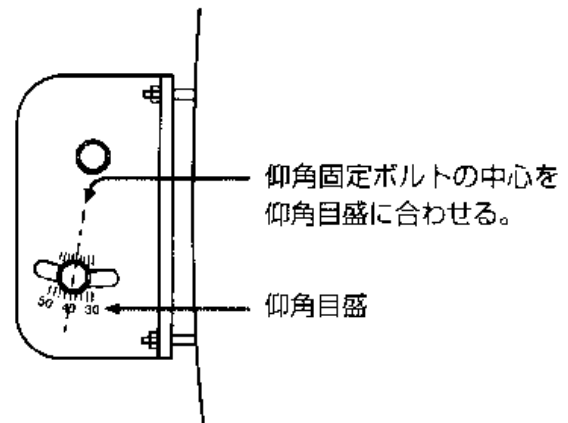


図 5.6 仰角固定ボルトの調整方法

5.4.2 方位角・仰角粗調整

- ① 図 5.7 のようにアンテナのフィードアーム上に磁気コンパスを乗せ、赤い磁針方向を 0° に合わせた時のフィードアーム方向からアンテナ指向方向を調べる。
- ② アンテナ指向方向が上で求めた磁北を基準にした方位角 C 度となるまで、図 5.4 のように方位角粗調整を行う。
- ③ アンテナを仰角方向にゆっくり回転させて、図 5.6 の仰角目盛を上で求めた仰角 A 度に合わせる。

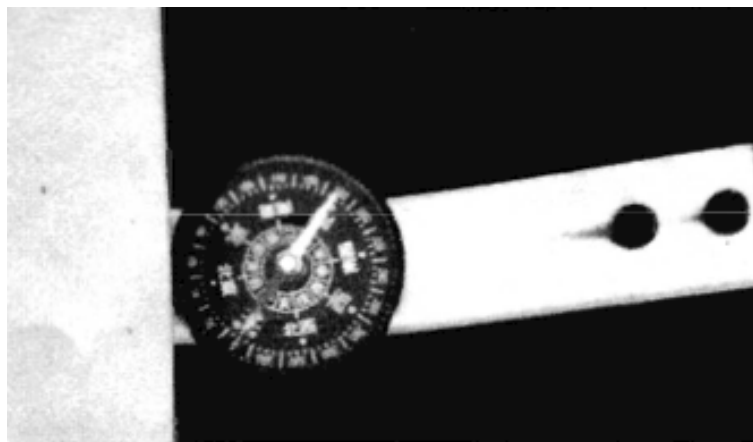


図 5.7 フィードアーム上に磁気コンパスを乗せてアンテナ方向を調べる

5.4.3 アンテナ指向方向微調整による BS 方向決定

- ① 仰角・方位角の調整では、まずスペクトラムアナライザを初期画面に設定し、BS 信号スペクトルが表示されるかを確認する。この時のスペクトラムアナライザの初期設定例を以下に挙げる。

CTR FREQ (CF) = 1200 MHz, FREQ SPAN = 1000 MHz, RF-Bandwidth (RFB) = 1 MHz, REFERENCE LEVEL = -20 dB, TIME/DIV = 1 s, VIDEO FLTR (VF) = 1 kHz, INPUT ATTENUATOR (ATT) = 10 dB, MARKER ON

- ② 表示されない場合は、トランシーバで相互に連絡を取り合いながら、表示されるまでアンテナの方位角方向を少し左右に、仰角を少し上下に動かして調整する。

- ③ BS 信号スペクトルが表示されるようになったら、**図 5.9** のように微調整表示画面に設定する。**図 5.9** において、白く光っている点がマーカ位置を示し、その読取值 (周波数および信号強度) が画面左上に表示される。マーカ位置は、ダイヤルを回して移動させる。この時のスペクトラムアナライザの微調整設定例を以下に挙げる。

CF = 1200 MHz, FREQ SPAN = 500 MHz, RBW = 100 kHz, ST = 10 s, ATT = 10 dB, VF = 100 Hz

- ④ **図 5.10** のようにテレビ画面に信号強度を表示する。受信レベルを表示させるには、**図 5.11** のリモコンを用いて、以下のように進んでいけば良い。

メニュー → 情報ボックス → 受信レベル

→ BS (上下矢印で移動) → BS チャンネル選択 (左右矢印で移動)

→ CS (上下矢印で移動) → CS チャンネル選択 (左右矢印で移動)

- ⑤ トランシーバで相互に連絡を取り合いながら、仰角方位角を微調整して、最大信号強度位置を決定する。
- ⑥ 最大受信信号レベルが変わらないことを確認しながら仰角固定ボルトと方位角固定ボルトをしっかりと締める。もし、値が変わったら調整し直してから締め直す。
- ⑦ 決定した放送衛星の仰角・方位角を記録する。

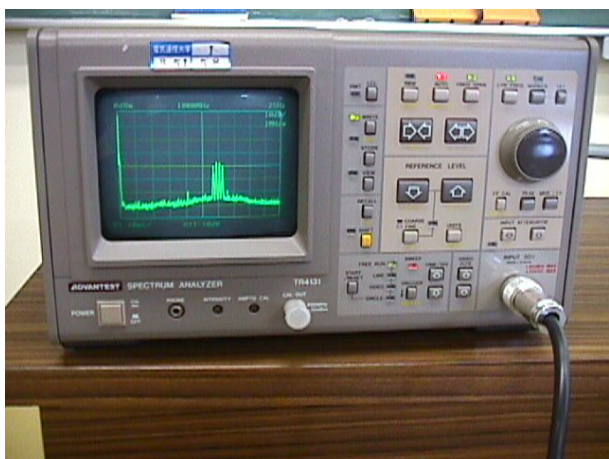


図 5.8 スペクトラムアナライザ操作パネル

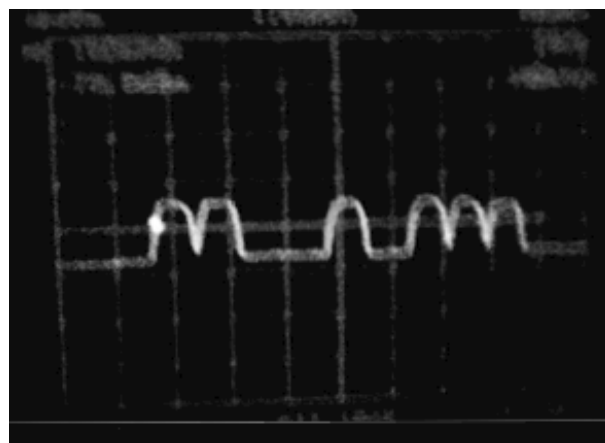


図 5.9 BS 信号スペクトル表示画面の例

5.5 BS および CS の信号スペクトル測定

- ① **図 5.9** の微調整スペクトラムアナライザの表示画面をノート (できればカメラでも) 記録する。
- ② マーカを移動させて、各々の山のスペクトル中心周波数および 3 dB 帯域幅を以下の手順で測定する。



図 5.10 受信レベル表示画面



図 5.11 リモコン操作ボタン配置

- パネル面右上の回転ダイヤルを回転させ、目的とするスペクトルが画面の中央に来るように調整する。
 - FREQ SPAN ボタンを押し、次に「矢印の先が向かい合っているボタン」を押して、スペクトルを拡大表示。
 - もう一度、回転ダイヤルを微調整して、目的とするスペクトルを画面中央線に合わせる。
 - この状態で、画面上部に表示されている周波数が、中央線の周波数である。
 - 画面右端の最上部に表示された周波数を 10 分の 1 した値が、画面の横目盛り 1 つの間隔になる。
 - 画面右端の上から 2 番目の dB 値が、縦目盛り 1 つの間隔になる。
 - 画面の各々の山の中央の周波数を、スペクトル中心周波数として読みとる。
 - その山の中心部強度から 3 dB 下がった左右位置の周波数差を、帯域幅として読みとる。
 - 存在するすべてのスペクトルのピークについて、スペクトル中心周波数と帯域幅を測定する。
- ③ スペクトラムアナライザの中心周波数 (CF) を 1300 MHz に設定し、CS 信号の一部が見えることを確認する (今回使用しているアンテナでは CS 信号は帯域外となり、減衰されていることに注意する)。
- ④ 図 5.10 の受信レベル画面で、BS と CS のチャンネルを選択し、各チャンネルの現在の受信レベルを測定する。

5.6 実習課題

1. 図 5.1 から求めた BS の仰角 A および真方位角 B を記せ。
2. 磁気偏角補正をして、求めた磁気方位角 C を記せ。
3. 最大強度微調整から決定した仰角および真方位角と、上の A および B の値とを比較して、結果を考察せよ。
4. 気象衛星「ひまわり」の静止位置は東経 140° E である。この仰角・真方位角を求め、BS との違いを求めよ。また、放送衛星がひまわりの位置にあった場合の利点、欠点を考察せよ。
5. スペクトラムアナライザ画面上に BS スペクトル全体を表示させ、スペクトルの特徴を記せ。
6. 全てのスペクトルのピーク (チャンネル番号に相当) の中心周波数、3 dB 帯域幅 (放送されていないチャンネルは記載不要)、受信レベルを記し、放送衛星信号スペクトルの特徴を考察せよ。
7. 各チャンネルのスペクトル中心周波数に表 5.1 のダウンコンバータ局部発振周波数を加え、各チャンネル送信周波数を求めよ。

アンテナ形式	オフセット型パラボラアンテナ
受信周波数範囲	11.7–12.01 GHz
受信偏波	右旋円偏波
アンテナ利得	32.1 dB
開口効率	76 %
ビーム半値角	4.3°
反射鏡短径	370 mm
コンバータ雑音指数	0.8 dB
コンバータ利得	53±5 dB
局発周波数	10.678 GHz
出力周波数	1.022–1.332 GHz
出力コネクタ F 型	75 Ω
出力 VSWR	2.5 以下
使用温度範囲	−30 – +50°C
耐風速	50 m/s
電源電圧	DC 15 V (出力端子から供給)
消費電力	1.4 W
外形寸法	395×495×525 mm
重量	約 1.7 kg

表 5.1 SONY BS アンテナ SAN-37K2SET 仕様

MEMO

実習課題 6

GPS 衛星受信実習

目的:

測位衛星信号の受信によって時刻や現在位置を精密に推定し、衛星測位に不確かさを与える要素を理解する。

6.1 GPS システム概要

衛星システム: GPS (Global Positioning System) は、地球を取り囲んで周回している約 30 機の衛星からの電波によって、地球上のあらゆる場所における高精度三次元測位を可能にするシステムである。GPS は、昇交点傾斜角が 55 度で昇交点経度が 60 度ずつ異なる 6 つの軌道に 4 機ずつの人工衛星を配し、24 衛星で全地球をカバーしている（実際には各軌道に予備機が存在するため、稼働中の衛星の数は 24 よりも多い）。衛星の周回周期は約 11 時間 58 分 2 秒であり、地球上のどこでも約 23 時間 56 分 4 秒ごとに同じ衛星の配置が上空に現れる。各衛星は 10.23 MHz の基準発振器を持っており、154 倍の $L1=1,575.42$ MHz と 120 倍の $L2=1,227.6$ MHz の 2 周波の右旋円偏波を全地球に向けて送信している。衛星から送信される航法データには、衛星軌道情報、衛星時計の情報、電離層補正データ、他の衛星の位置情報等が含まれている。

GPS による測位の仕組み: GPS 衛星には、セシウム発振器やルビジウム発振器が搭載されており、これを USNO の原子時計系で制御していることから衛星から送信する変調信号の送信時刻を正確に知ることができる。ここで、受信点位置を正確に同定し、特定衛星を受信することにより、受信点での時刻を正確に求めることができる。また、この時刻測定を複数受信点で同時に、かつ同じ衛星を利用して行うことにより、媒介となる衛星時刻系の誤差を最小にすることができ、受信点間の時刻比較を行うことが可能となる。同時に少なくとも 4 機の GPS 衛星からの電波を受信できれば、衛星からの変調符号の送信時刻を同時仮定して、衛星間の時刻差を求めることができる。この時刻差を 4 機の衛星間で取り、また、衛星の軌道要素から衛星送信位置を同定して、幾何方程式を解くことによって、受信点の位置を推定することができる。ただし、受信する衛星の相対位置関係が良好な条件下でない場合、幾何方程式に含まれる誤差が大きくなり、解のずれが大きくなるので注意を要する。

6.2 GPS 衛星測位信号受信実習

この実習では、eTrex30J というハンディタイプの衛星測位信号受信機を用いる。この受信機は、GPS およびロシアの衛星測位システムである GLONASS 衛星群、日本の準天頂衛星からの測位信号に加えて、WAAS/MSAS のような静止衛星型衛星航法補強システムからの補足信号を受信し、決定された受信点の位置を地図上に表示・内部メモリに記録することができる。また、その過程においては、利用可能な衛星の一覧を表示することも可能となっている。受信できる衛星の数は最大 52 である。データ解析用パソコンを受信機と接続することで、受信機に記録されたデータの抽出も可能

である。以下、操作手順を概説する。

6.2.1 ハンディタイプ衛星測位信号受信機の操作方法

- ① 野外実習を行う前に電池の残量が十分かどうかを確認し、必要であれば交換しておく。電池の交換は、背面のレバーを上にして、反時計回りに回してカバーを外し、電池を挿入する (図 6.1 参照)。



図 6.1 eTrex30J 電池交換の方法

- ② 照明ボタンを長押しして、電源を入れる。受信機の操作は、図 6.2 に示されているような各種のボタンで行う。



図 6.2 受信機の各種ボタンの説明



図 6.3 受信する衛星を設定する画面

- ③ 受信衛星の設定を行う。受信衛星モードは GPS のみと、GPS + GLONASS の 2 種類から選択できる。「設定」→「システム」→「衛星受信モード」から選択することができる。また、補足信号として、MSAS/WAAS の有無を選択することも可能で、「設定」→「システム」→「MSAS/WAAS」の順に操作する。詳細は図 6.3 を参照のこと。実習では、1 つの班で複数の受信機を持って移動するが、以下の表 6.1 のように、各自がそれぞれ異なった設定で受信機を運用するようにすること。

衛星受信モード	MSAS/WAAS
GPS	オフ
GPS	オン
GPS + GLONASS	オフ
GPS + GLONASS	オン

表 6.1 受信衛星の組み合わせ

- ④ 軌跡情報の初期化を行う。この初期化を行わない場合、前に保存された軌跡情報と連続する形で記録が始まってしまいうので注意を要する。初期化は、「軌跡設定」から「現在の軌跡を消去する」を選択すればよい。
- ⑤ 衛星情報の確認を行う。メニュー画面から「衛星情報」を選択し、受信している衛星の数と識別番号を確認する。図 6.4 の右下にある棒グラフは、受信している衛星の識別番号 (PRN 番号) と、信号の受信強度を示す。01-32 までは GPS 衛星を表し、50-90 は GLONASS を表す。193 は、日本の準天頂衛星を表す。棒グラフに「D」という表示がある場合は、MSAS または WAAS からの信号も受信していることを示す。また、図 6.4 に GPS+GLONASS 5 m という表示が出ているが、これは GPS と GLONASS を使用して誤差 5 m 程度の測位ができていることを表している。



図 6.4 衛星情報の確認画面

- ⑥ 軌跡データの保存について確認する。eTrex30J では、電源投入と同時に自動的に軌跡の記録が始まる。記録を保存するには、図 6.5 のように、メニュー画面から「軌跡管理」→「現在の軌跡」→「軌跡保存」→「(ファイル名を入力して) OK」の順に操作をすればよい。



図 6.5 軌跡データの保存設定画面

- ⑦ 時刻を確認する。メニュー画面から「アラーム」を選択すれば、図 6.6 に示されているような形式で、現在時刻を確認することができる。
- ⑧ 地図を表示する。メニュー画面から「地図」を選択すれば、図 6.7 に示されているような形式で、現在地を確認することができる。同時に軌跡も確認できる。また、メニューボタンで、表示方法などのカスタマイズも行うことができる。



図 6.6 時刻の確認画面

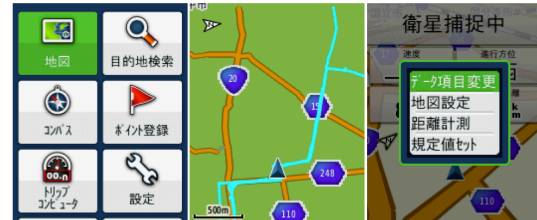


図 6.7 現在地を地図上に表示する画面

6.2.2 取得データの処理方法

eTrex30J では、軌跡を GPX ファイルという形式で記録している。記録の時間間隔は 15 秒である。また、時刻情報は全て世界標準時 (UTC) で表現されている。野外実習が終わった後、eTrex30J と Windows マシンを USB で接続してデータの転送を行う。詳しくは、TA にその方法を確認すること。得られるデータのフォーマットを以下に示す。

例:

```
<trkpt lat="35.6573575549" lon="139.5413930900"><ele>56.86</ele>
<time>2012-02-19T23:55:32Z</time></trkpt>
```

意味:

```
<trkpt lat="北緯 [ °]" lon="東経 [ °]"><ele>海拔高度 [m]</ele>
<time>年-月-日 T 時:分:秒 Z</time></trkpt>
```

実習では、Windows 上で動作する GMapWidget というソフトを用いて GPX データの読み込みおよび可視化を行う。

GMapWidget 上での軌跡の表示

- ① GMapWidget のフォルダを開き、index.html をクリック (図 6.8 参照)。クリックすると、ブロックがかかることがあるが、許可して続行する。

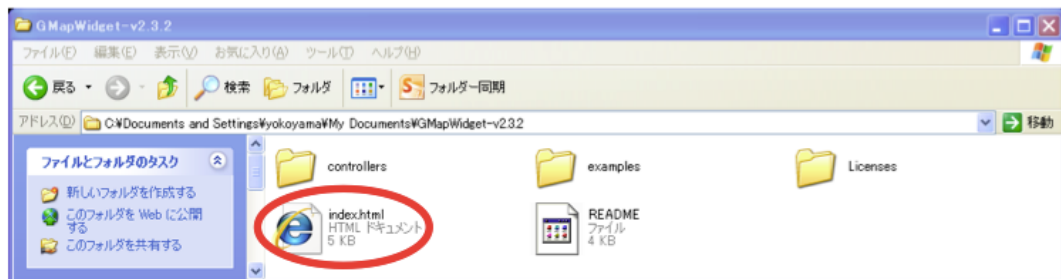


図 6.8 GMapWidget フォルダ

- ② 「GPX Casual Editor」をクリック (図 6.9 参照)。
- ③ 「Importer」をクリック (図 6.10 参照)。クリックすると、ブロックがかかることがあるが、許可して続行。



図 6.9 GMapWidget Controllers



図 6.10 GPX Casual Editor

- ④ 予め、メモ帳などで GPX ファイルを開いておき、画面に貼り付けた後、「インポート」をクリック (図 6.11 参照)。

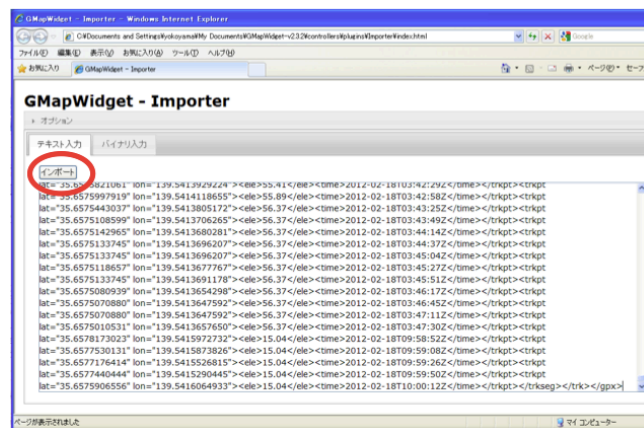


図 6.11 GMapWidget Importer

- ⑤ 「GPX Casual Editor」に戻れば、描かれた軌跡を確認することができるので Windows の PrintScreen 機能を使って保存する (図 6.12 参照)。
- ⑥ 軌跡の任意点をクリックすると図 6.12 のような表示が現れる。Name には、日時 (UTC) が入っている。



図 6.12 GMapWidget 上に表示された軌跡の例

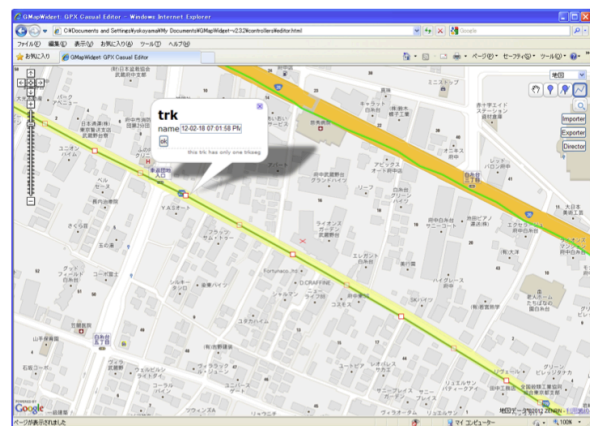


図 6.13 軌跡をクリックした際に表示される情報

GoogleEarth 上での軌跡の表示

以下の手順で、GPX ファイルを GoogleEarth が読み込むことができる KML ファイルに変換する。

- ① GPX Casual Editor を開くまでは、GMapWidget 読み込み方法と同じ。
- ② 「Exporter」をクリック (図 6.14 参照)。クリックすると、ブロックがかかることがあるが、許可して続行する。
- ③ 形式を選ぶところで KML を選択する (図 6.15 参照)。



図 6.14 GPX Casual Editor



図 6.15 GMapWidget Exporter

- ④ 予め、メモ帳などで GPX ファイルを開いておき、画面に貼り付けた後、「export」をクリックする (図 6.16 参照)。
- ⑤ 指示に従い、内容をテキストエディタにコピーして、UTF-8 で保存する (図 6.17 参照)。ここで、保存ファイル名前の拡張子を ".kml" にすることに注意する。



図 6.16 Exporter データ取り込み例

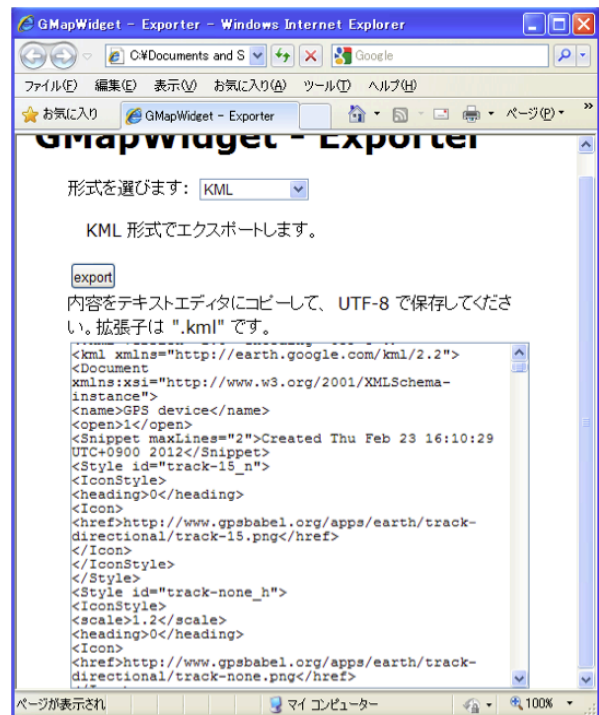


図 6.17 Exporter データ書き出し例

⑥ GoogleEarth で開くと図 6.18 のようになる。

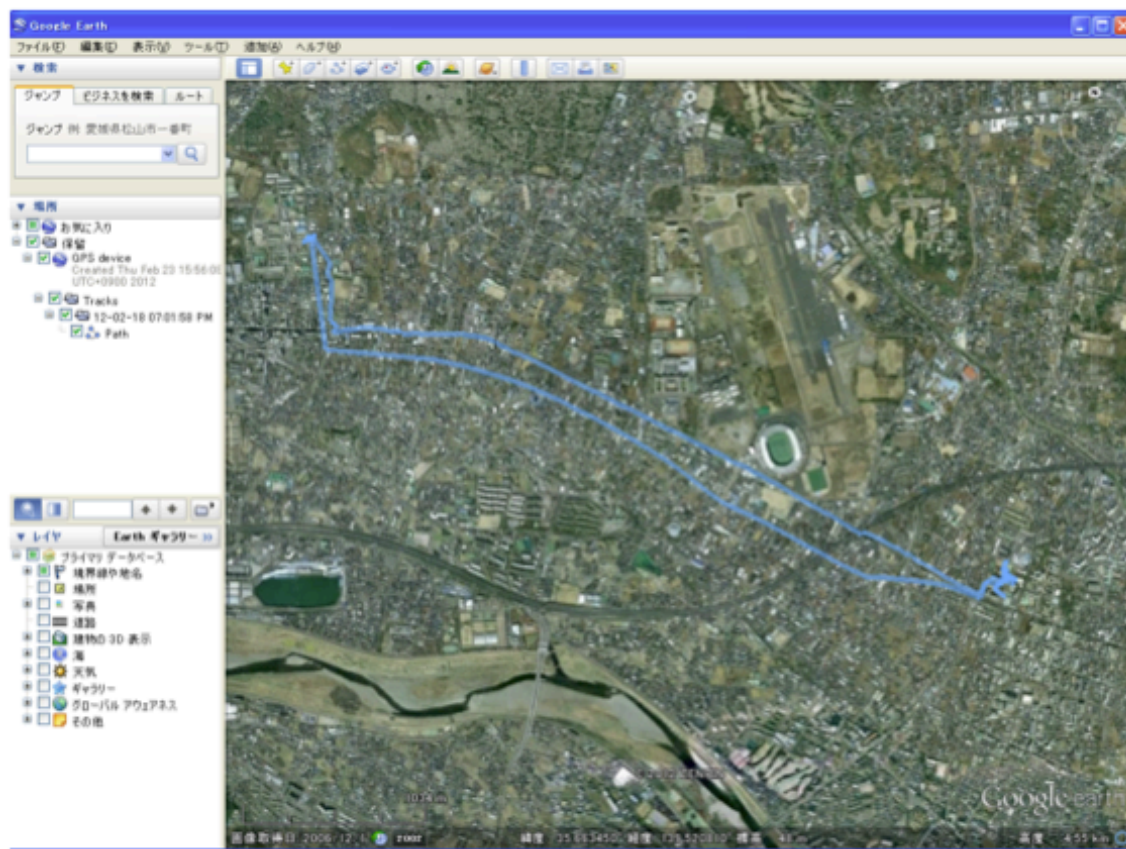


図 6.18 GoogleEarth による軌跡の表示

6.3 GPS 衛星測位信号定点観測実習

移動測定と並行して、観測所に設置した GPS 受信機で定点測定も行う。

6.3.1 使用機器

- GPS 受信機 FURUNO TS820
- データ記録用パソコン
- 時刻比較用オシロスコープ

6.3.2 時刻比較

パソコン画面上で、GPS 受信機から出力される時刻と自分の時計の時間ずれを測定せよ。
(オプション: 可能であれば、他の機器から出力される 1 秒パルスの時間差を測定する。)

6.3.3 測位データの取得

定点観測においても、測位データの取得を行う。観測点を移動せずに測定を続けているため、本来ならば位置変化はないはずであるが、使用できる衛星の個数によっては、位置決定誤差が生じる。この誤差の評価を行う。データの取得手順については TA の指示に従うこと。取得データの受け渡しについては、以下の記述を参照のこと。

★ 取得データの受け渡し方法

USB メモリなどを持参している人はそのメモリ経由で取得したデータを家に持ち帰るとよい。

そのようなメディアを持ってきていない人は、自分のものとわかる名前で保存したファイルを宇宙通信工学用のデータ保存サーバーへアップロードしておき、自宅からダウンロードすることができる。**(但し、他のメンバーもそのファイルを自由にダウンロードできてしまう)**

アップロードしたいファイルを右クリックし、「送る」 から upload-group ○ を選択。○ の部分は班番号。

自宅から以下のアドレスにアクセスしダウンロードできる: <http://gwave.ice.uec.ac.jp/~sce/>。

6.4 実習課題

1. 受信衛星状態の観測

受信点を移動して周囲の状況を変えた場合、受信衛星範囲がどのように変化するかを観測し、何によって影響されているかを調べよ。

2. 受信点位置の計測 (移動測定の場合)

受信点位置を短い間隔で計測し、位置および高度の変動を評価する。取得データを元に、グループで移動観測を行った道筋を配布されたマップの上に描き (GMapWidget もしくは GoogleEarth などを用いて構わない)、実際に歩いた道筋と照らし合わせて、どの程度のずれがあるのかを考察すること。また、そのずれが用いた衛星の組み合わせ (表 6.1 参照) にどのように依存しているかについても検討せよ。

3. 受信点位置の計測 (定点測定の場合)

長時間定点観測記録から、GPS の決定位置値を時系列でプロットし、平均位置 (緯度、経度、高度) と位置決定誤差 (標準偏差および最大値) を求めよ。また、位置決定誤差が使用衛星数に依存しているかどうかについても考察を行って欲しい。

注: 取得データ中の位置情報は緯度値と経度値であるので、実際の水平距離誤差 [m] に変換した値も求めること。経度方向の距離を計算する際に、緯度を考慮に入れること (自転軸からの距離 = 地球半径 $\times \cos \theta$: θ は緯度)。

4. 時刻の測定

eTrex30J で与えられる時刻と自分の時計の時刻と比較し、どのくらいずれているかを記録せよ。

★ 変換後データのフォーマットについて

出力データは拡張子が dat のファイルを用いる。

AAAAAA.dat: ファイル 年月日、時刻、緯度、経度、測位状況、使用衛星数、DOP、高度 [m]

dat ファイルフォーマット

```
YYYY,MM,DD,hh,mm,ss,NN,nn.nnn,N,EEE,ee.eee,E,i,j,aa.aa,hhhh,gg,
2014,8,9,16,48,17,36,31.390,N,138,19.082,E,1,6,2.95,1292,39,
2014,8,9,16,48,18,36,31.390,N,138,19.082,E,1,6,2.95,1292,39,
2014,8,9,16,48,19,36,31.390,N,138,19.082,E,1,6,2.95,1292,39,
2014,8,9,16,48,20,36,31.390,N,138,19.082,E,1,6,2.95,1292,39,
2014,8,9,16,48,21,36,31.389,N,138,19.082,E,1,6,2.95,1292,39
```

YYYY,MM,DD hh:mm:ss	観測時刻 (世界標準時: UTC = JST - 9 時間)
NN nn.nnn	北緯 NN 度 nn.nnn 分
EE ee.eee	東経 EE 度 ee.eee 分
i	測位状況 1: 測位利用可 0: 測位利用不可
j	使用衛星数
aa.aa	測位誤差 (DOP: dilution of precision, 00.00 の場合は誤差評価できないこと示している)
hhhh	海拔高度 [m]
gg	ジオイド高 [m]

注意: 位置は、度 + 分で表示されているので、分から度への換算時に間違えないようにすること。

★ GoogleEarth について

配布した実習課題用のマップは GoogleEarth を用いて作成している。以下のサイトからダウンロードしてインストールすることができる。

Google Earth: <http://earth.google.com/download-earth.html>

実習では、eTrex30J から主力される GPX ファイルから GoogleEarth が読み込むことができる KML 形式のファイルを作成する。GoogleEarth を自分のコンピュータにインストールし、生成した KML ファイルを開くと経路情報が地図上にマップされる。また、Web 上で提供されている KML generator を用いて、任意の緯度・経度情報を KML 形式のファイルに変換することも可能である。興味があれば試してみたい。

KML generator: <http://dev.bt23.org/keyhole/kmlgen/>

実習課題 7

アマチュア無線衛星通信実習（特別実習）

目的

アマチュア無線衛星と電波の送受信を行い、衛星までの距離・テレメトリデータの解析を行う。

7.1 アマチュア無線衛星通信概論

アマチュア無線衛星とは、アマチュア無線の電波を中継する機能を持った衛星のことで、Orbiting Satellite Carrying Amateur Radio (略称:OSCAR) と呼ばれる。図 7.1 のように人工衛星を中継して、離れた地上のアマチュア無線局間の交信をサポートしている。現在、アマチュアが使う衛星には静止衛星は一つも無く、地上からの見える方向が時間とともに変わるため、常に衛星の位置を把握していなければアマチュア衛星通信は出来ない。さらに、衛星が相対的に高速で動いているために起こるドップラー効果によって周波数に変移することを考慮したり、信号が地上と衛星との間を往復するのにかかる時間を考えたりする必要がある。

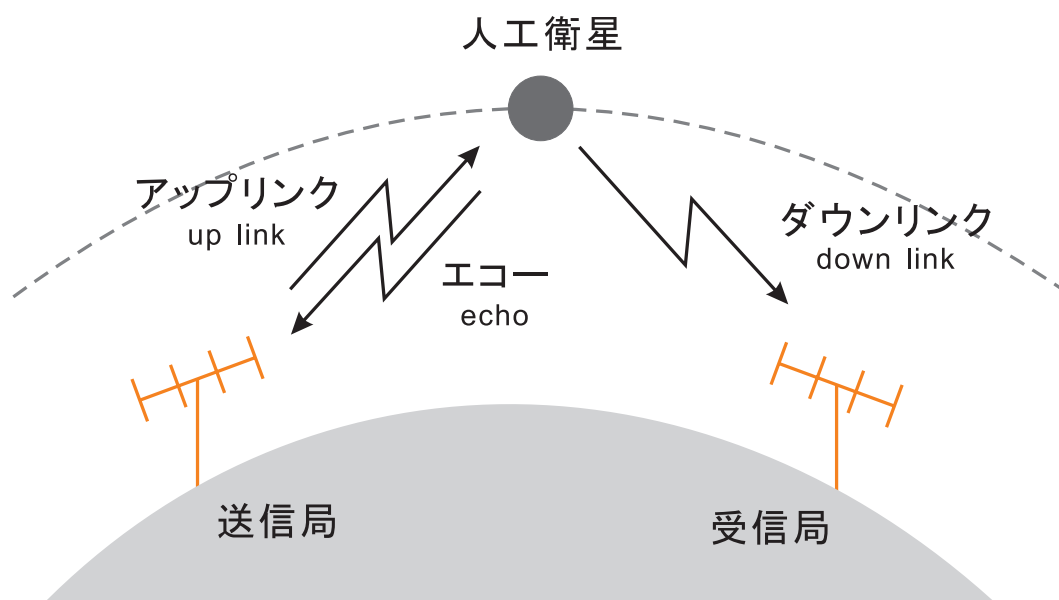


図 7.1 衛星通信の概念図

地上から衛星に送られた信号 (アップリンク信号) は、衛星内のトランスポンダで他の周波数に変換され、地上へ戻される信号 (ダウンリンク信号) となる (図 7.2 参照)。

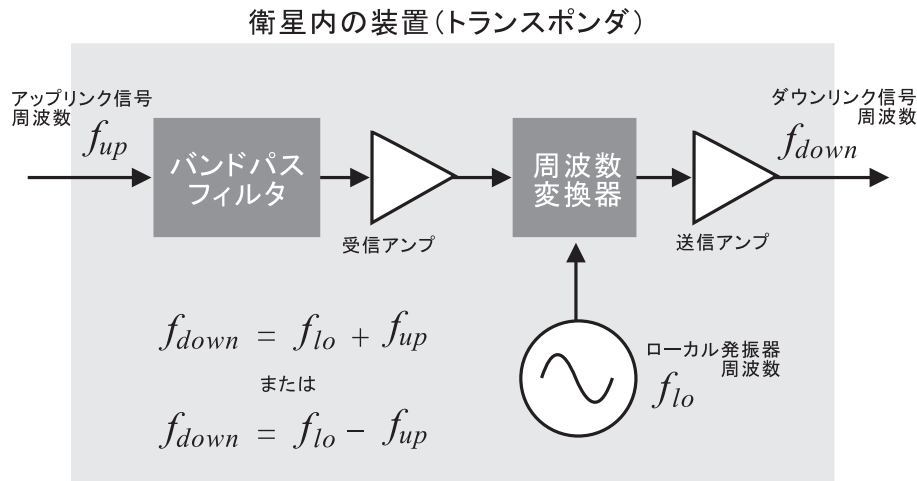


図 7.2 衛星内の中継装置 (トランスポンダ) の模式図

7.2 アマチュア無線衛星通信に用いる設備

ここでは、アマチュア無線衛星通信に用いる設備を、室内設備 (送受信機・コントロール系) と屋外設備 (アンテナ系) に分けて概説する。

7.2.1 室内設備の概要

アマチュア無線衛星通信に用いる室内設備の全体写真を 図 7.3 に示す。送受信機・サテライトトラッカー・ローテータコントローラー・パソコンの 4 つの機器で構成されている。以下、それぞれの構成機器について役割・使用方法などを解説する。



図 7.3 アマチュア無線衛星通信に用いる室内設備の全体写真

送受信機 IC-821

アマチュアが使える周波数のうちの 2 つのバンド (114–146 MHz、430–440 MHz) について送受信ができる無線機である。



図 7.4 アマチュア無線機 IC-821

この無線機のつまみ・スイッチ類の説明を以下にあげる。

- **POWER スイッチ**

電源を ON/OFF するスイッチ

- **アップリンク周波数・ダウンリンク周波数**

右側の小さな数字がアップリンク周波数 (送信周波数)、左側の大きな数字がダウンリンク周波数 (受信周波数)。

- **メータ**

受信信号の強さに応じてメータの針が振れる。

- **MAIN AF ツマミ**

受信音量を調整するためのつまみ。

- **PREAMP スイッチ**

このスイッチを ON にすると受信信号が増幅される。但し、衛星からの信号は非常に弱いので、普段は ON にしたままにしておく (430MHz 帯でのみ動作)。

- **メインつまみ**

周波数の設定はこのつまみで行う。

- **RIT - M (ダウンリンク周波数微調整) スイッチ**

サテライトモード (後述) の時に限り動作するスイッチ。このスイッチを押すとアップリンク周波数が消え、メインつまみでダウンリンク周波数のみを動かすことが出来る。

- **SCAN - S (アップリンク周波数微調整) スイッチ**

サテライトモードでのみ動作するスイッチ。このスイッチを押すとダウンリンク周波数が消え、メインつまみでアップリンク周波数のみを動かすことが出来る。

- **CALL - RIT (ダウンリンク周波数微調整) スイッチ**

サテライトモードでのみ動作するスイッチ。このスイッチを押すと、左隣にある RIT ツマミでダウンリンク周波数のみを動かすことが出来る。スイッチを OFF にすると、正しいアップリンク周波数 - ダウンリンク周波数の関係に戻る。

★ サテライトモードについて

衛星通信ではアップリンク周波数とダウンリンク周波数が一対一に対応している。そのため、本来ならばアップリンク周波数とダウンリンク周波数をそれぞれ別々にツマミで調整しなければならないが、この無線機ではダウンリンク周波数を変化させると自動的にアップリンク周波数も変化するモード（サテライトモード）が備わっている。ただ、この機能はドップラー効果による周波数の変移については考慮していないので、アップリンク周波数（ダウンリンク周波数）を微調整する必要がある。

★ サテライトモードの設定方法

- ① まず、衛星の周波数の表を見てアップリンク周波数のうち最も低い周波数を調べ、メインツマミを使いその周波数に設定する。
- ② 次に、M/S スイッチを押し、メインツマミを使って「最も低いアップリンク周波数」に対応するダウンリンク周波数に設定する。
- ③ FUNC スイッチを押す。
- ④ ノーマルモードの時は NOR スイッチを、リバースモードの時は REV スイッチを、ピッピピとなるまで押す。
- ⑤ 設定完了。メインツマミを動かすとアップリンク・ダウンリンクの両周波数とも動く。

サテライトトラッカー RAC805

衛星通信では、地上から衛星までの距離がかなりあることと、周辺で発生するノイズから逃れるために、高利得のビームアンテナを用いる。しかし、通信に使用する衛星が静止衛星ではないために時間とともに地上から見える方向が変わってしまう。従って、常にビームアンテナを衛星に向けるためには、衛星の動きに合わせてビームアンテナの方向を変えなければならない。そのアンテナの方向を自動的に計算してくれるのが、このサテライトトラッカー RAC805 である。



図 7.5 サテライトトラッカー RAC805

方位角ローテータコントローラー・仰角ローテータコントローラー

アンテナビーム方向の方位角を調整する方位角ローテータ（後述）と、仰角を調整する仰角ローテータ（後述）を室内から操作するためのコントローラー。



図 7.6 方位角ローテータコントローラー・仰角ローテータコントローラー

コンピュータ

追尾中の衛星の方位角・仰角や、衛星までの距離・ドップラーシフトの大きさなどの情報を表示する。

7.2.2 屋外設備 (アンテナ系) の概要

アンテナ系は、アンテナ本体とアンテナの方向を調整するローテータ、信号を増幅するプリアンプからなっている。

クロス八木アンテナ

2本のテレビアンテナを垂直に取り付けたような構造になっている。図 7.7 左側が 430MHz のもので 20 エレメント、右側が 144MHz のもので 12 エレメントのクロス八木アンテナである。このアンテナから放射された電波は円偏波となるが、右旋・左旋が切り換えられるようになっている。

受信プリアンプ

衛星からの信号は非常に弱いため、受信信号を一度このプリアンプで増幅し、その信号を無線機で受信している。



図 7.7 クロス八木アンテナ

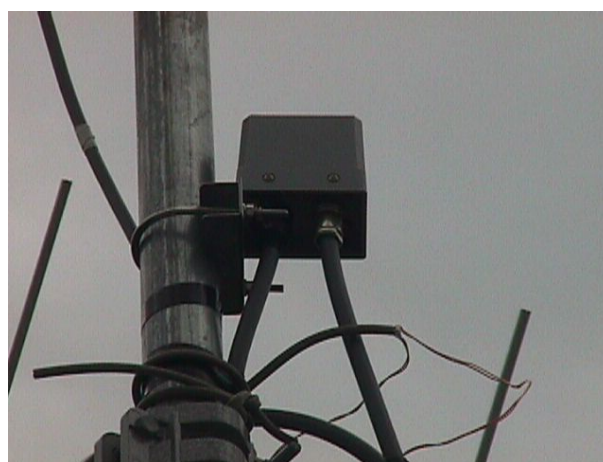


図 7.8 受信プリアンプ

方位角ローテータ・仰角ローテータ

前述した、室内のローテータコントローラーによって操作することで、アンテナ方向の方位角・仰角を調整することができる。



図 7.9 方位角ローテータ



図 7.10 仰角ローテータ

7.2.3 システム概要のまとめ

以上で示したシステム構成要素をまとめると以下の 図 7.11 のようになる。

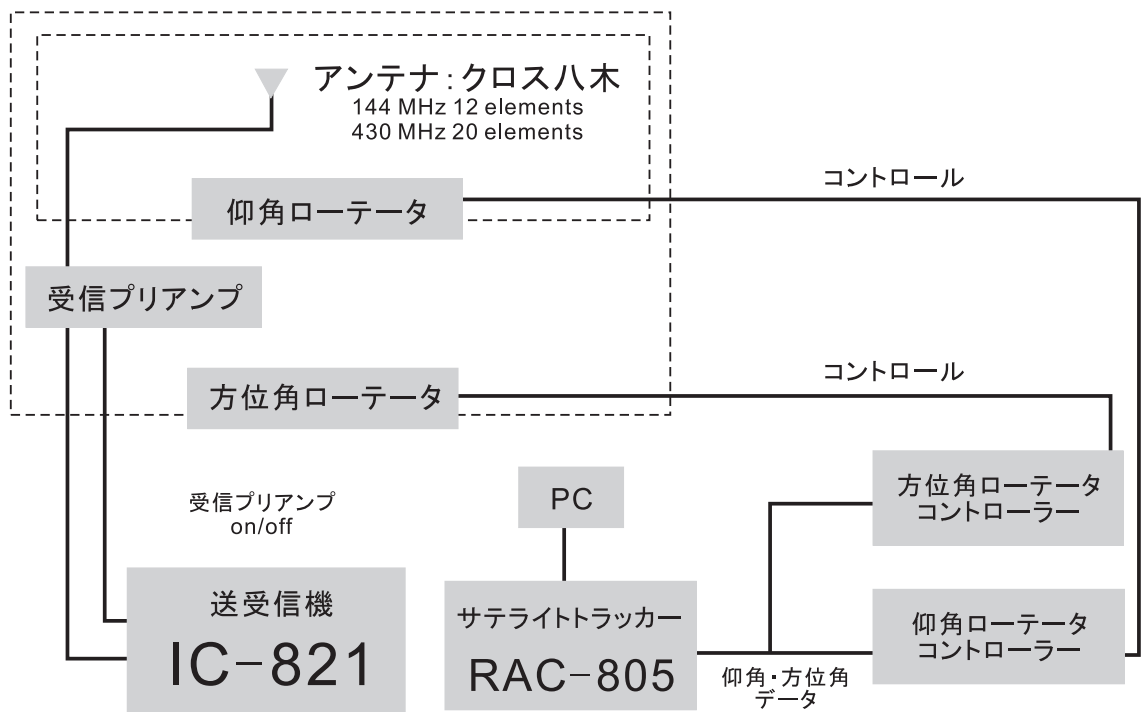


図 7.11 システム構成要素のブロックダイアグラム

7.3 ドップラースhiftと時間遅れの観測

7.3.1 ドップラースhiftの観測

ドップラー効果による周波数の変化を、リサージュ図形を描かせることで調べる。

- ❶ 衛星から出ているビーコン (標識電波) を捜し、受信機の音声出力をオシロスコープの片方のチャンネルに入力。
- ❷ オシロスコープの別のチャンネルには 800 Hz の正弦波を入力する。
- ❸ この二つの入力信号を用いてリサージュ図形を描かせる。
- ❹ ビーコンの周波数を微調整する。ビーコンの周波数と受信機の受信周波数が一致すると、受信されたビーコン信号は 800 Hz の音となって音声出力に現れる。
- ❺ このとき、二つの入力信号は周波数が等しく、振幅が異なるだけなので、リサージュ図形は円か楕円になるはず。
- ❻ その後、受信周波数を変えずに、リサージュ図形の様子を見る。

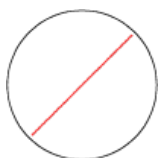
7.3.2 時間遅れの観測

衛星に向けて信号を送り、信号が衛星から戻ってくるまでの時間を測定して、地上から衛星までの距離を計算する。

- ❶ 無線機をサテライトモードに設定して、衛星通信が出来る状態にする。
- ❷ アップリンク周波数とダウンリンク周波数を確認する。
(実際には、ドップラースhiftがあるので、ダウンリンク周波数を微調整する必要がある)
- ❸ 無線機のダウンリンク側の音声出力をオシロスコープに入力する。
- ❹ 無線機から信号が出される瞬間にオシロスコープのトリガが掛るようにした後衛星に向け信号を送る。
- ❺ トリガが掛ってから音声出力にダウンリンク信号が現れるまでの時間差をオシロで見て衛星までの距離を計算。

★ リサージュ図形とは ...

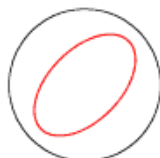
互いに直角方向に振動する二つの単振動を合成して得られる平面図形の総称。例えば、横軸に $\cos \theta$ 、縦軸に $\sin \theta = \cos (\theta + \pi/2)$ を与えると真円になる。また、位相差を 0 にすると直線になる。入力を一般的に考えて、横軸に $A \cos n\theta$ 、縦軸に $B \cos (m\theta + \gamma)$ とおき、入力振幅比 A/B 、周波数比 n/m 、および位相差 γ を任意に変化させると、リサージュ図形は下図のようになる。左から 4 つは周波数が同一の信号を入力した場合に現れるリサージュ図形であり、一番右のものは周波数比が 5:6 で位相差 0 の場合に現れるものである (電通大のロゴに使われている)。簡単のため振幅比 A/B は 1 にしてある。



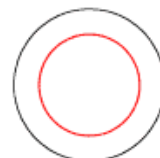
$$n/m = 1, \gamma = 0^\circ$$



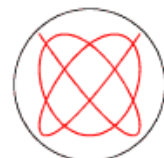
$$n/m = 1, \gamma = 30^\circ$$



$$n/m = 1, \gamma = 60^\circ$$



$$n/m = 1, \gamma = 90^\circ$$



$$n/m = 5/6, \gamma = 0^\circ$$

7.4 テレメトリデータ受信

アマチュア衛星 FO-29 は、衛星各部の電圧や電流、温度などの状態を、16 進数のデータとしてモールス符号で常を送信している (テレメトリ)。ここでは 16 進数で表現されたテレメトリを解読し、衛星に関する情報を抽出する方法を解説する。

7.4.1 テレメトリ解読方法概要

テレメトリ形式

HI HI 1A 1B 1C 1D 2A 2B 2C 2D 3A 3B 3C 3D 4A 4B 4C 4D 5A 5B 5C 5D 6A 6B 6C

この 16 進数のデータを解読する方法を以下に示す。

システムデータの解読

システムデータは、1A、1B、1C の 3 つの 16 進数に格納されている。1A、1B、1C を 2 進数に変換したうえで、以下の表に従って復元する。

重み	項目	1	0
0	メインリレー	OFF	ON
2	DCM	ON	OFF
4	SRAM	ON	OFF
8	packet1200/off	1200	9600 or OFF
16	packet /9600	9600	1200 or OFF
32	JTA	ON	OFF
64	JTD	ON	OFF
128	地磁気センサ	ON	OFF

表 7.1 テレメトリ要素 1A 解読対応表

重み	項目	1	0
0	太陽センサ	ON	OFF
2	UVC	ON	OFF
4	UVC レベル	2	1
8	PCU モード	MANU	AUTO
16	PCU レベル 1/2	2	1 or 3
32	PCU レベル 3	3	1 or 2
64	バッテリーモード	TRIC	FULL
128	バッテリーロジック	TRIC	FULL

表 7.2 テレメトリ要素 1B 解読対応表

重み	項目	1	0
0	not used		
2	not used		
4	not used		
8	not used		
16	デジトーカーモード	ON	OFF
32	not used		
64	UVC ACT / PAS	ON	OFF
128	CPU RUN / RESET	RUN	RESET

表 7.3 テレメトリ要素 1C 解読対応表

アナログデータの解読

2C、2D は衛星のスピン周期を表している。2C、2D をそれぞれ 2 進数に変換して、1 がたった項目のスピン周期の値の和が衛星のスピン周期となる (表 7.4、表 7.5 参照)。例えば、2C が 04_H 、2D が $8F_H$ のとき、 $04_H=00000100$ 、 $8F_H=10001111$ なのでスピン周期 = $8192 + 128 + 64 + 32 + 16 + 1 = 8433$ (ms) となる。

2C の重み	128	64	32	16	8	4	2	0
スピン周期	256	512	1024	2048	4096	8192	未使用	未使用

表 7.4 アナログデータ 2C 解読対応表

2D の重み	128	64	32	16	8	4	2	0
スピン周期	1	2	4	8	16	32	64	128

表 7.5 アナログデータ 2D 解読対応表

その他のアナログデータの解読

該当する 16 進数を 10 進数に変換し、その値を n とすると、以下の表から各々の値が求められる。

該当データ	項目	計算式
3C	地磁気センサ Z 軸	$BZ=(n+102) \times 490.196 - 50000$ (nT)
3D	地磁気センサ Y 軸	$By=n \times 490.196$ (nT)
4A	太陽電池発生電流	$I=0.009804 \times n$ (A)
4B	バッテリー充放電電流	$I=-(2-n \times 0.0196)$ (A)
4C	バッテリー端子電圧	$V=0.10761 \times n$ (V)
4D	バッテリー中間端子電圧	$V=0.04817 \times n$ (V)
5A	バス電圧	$V=0.09804 \times n$ (V)
5B	JTA 送信出力	$P=6.4997 \times n - 98.0863$ (mW)
5C	構体温度①	$T=-0.388375 \times n + 81.883$ (°C)
5D	構体温度②	$T=-0.388375 \times n + 81.883$ (°C)
6A	構体温度③	$T=-0.388375 \times n + 81.883$ (°C)
6B	構体温度④	$T=-0.388375 \times n + 81.883$ (°C)
6C	バッテリーセル温度	$T=-0.388375 \times n + 81.883$ (°C)

7.4.2 テレメトリ解読例

ここでは、以下のテレメトリを例にとって、システムデータ・アナログデータの復元例を示す。

受信したテレメトリ

HI HI AE C7 88 55 00 E5 BF 19 09 46 57 73 B4 61 94 92 B0 76 A5 A6 A6 A4 A2

システムデータ

- 1A: $AE_H=10101110$ → メインリレー ON、DCM ON、SRAM ON、Packet 1200bps
JTA ON、JTD OFF、地磁気センサ ON
- 1B: $C7_H=11000111$ → 太陽センサ ON、UVC ON、UVC レベル 2、PCU モード AUTO
PCU レベル 1、バッテリーモード TRIC、バッテリーロジック TRIC
- 1C: $88_H=10001000$ → デジトーカーモード OFF、UVC OFF、CPU RUN

アナログデータ

2C: $BF_H=10111111$

2D: $19_H=00011101$

→ スピン周期 $=8192+4096+2048+1024+256+128+32+16+8=15800$ (ms)

その他のアナログデータ

地磁気センサ Z 軸	3C:57 _H =87	→	$B_z=(87+102) \times 490.196-50000=42647.044$ (nT)
地磁気センサ Y 軸	3D:73 _H =115	→	$B_y=115 \times 490.196=56372.54$ (nT)
太陽電池発生電流	4A:B4 _H =180	→	$I=0.009804 \times 180=1.76472$ (A)
バッテリー充放電電流	4B:61 _H =97	→	$I=-(2-97 \times 0.0196)=-0.0988$ (A)
バッテリー端子電圧	4C:94 _H =148	→	$V=0.10761 \times 148=15.92628$ (V)
バッテリー中間端子電圧	4D:92 _H =146	→	$V=0.04817 \times 146=7.03282$ (V)
バス電圧	5A:B0 _H =176	→	$V=0.09804 \times 176=17.25504$ (V)
JTA 送信出力	5B:76 _H =118	→	$P=6.4997 \times 118-98.0863=668.8783$ (mW)
構体温度①	5C:A5 _H =165	→	$T=-0.388375 \times 165+81.883=17.801125$ (°C)
構体温度②	5D:A6 _H =166	→	$T=-0.388375 \times 166+81.883=17.41275$ (°C)
構体温度③	6A:A6 _H =166	→	$T=-0.388375 \times 166+81.883=17.41275$ (°C)
構体温度④	6B:A4 _H =164	→	$T=-0.388375 \times 164+81.883=18.1895$ (°C)
バッテリーセル温度	6C:A2 _H =162	→	$T=-0.388375 \times 162+81.883=18.96625$ (°C)

★ 2 進数、10 進数、16 進数 の変換について (参考)

16 進数	0 _H	1 _H	2 _H	3 _H	4 _H	5 _H	6 _H	7 _H	8 _H	9 _H
2 進数	0000	0001	0010	0011	0100	0101	0110	0111	1000	1001
10 進数	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9

10 _H	11 _H	12 _H	13 _H	14 _H	15 _H	16 _H
1010	1011	1100	1101	1110	1111	10000
10	11	12	13	14	15	16

7.5 実習課題 (希望者のみ)

1. テレメトリデータ受信

モールス符号による衛星テレメトリデータから、実際の物理的値に変換した結果を記せ。

2. ドップラーシフトの観測

ドップラー効果による周波数変化を測定し、その時間変化を図に描け。この変化から何が分かるかを説明せよ。

3. 時間遅れによる衛星までの距離測定

実際に衛星に向けて信号を送り、その信号が衛星から戻ってくるまでの時間を測定して、地上から衛星までの距離を計算せよ。ただし、送受信機の内部遅れは 4 (ms) とする。