

宇宙通信工学実習テキスト

Space Communication Engineering

August 2011



実習課題 1

極軌道気象衛星受信実習

目的

菅平宇宙電波観測所の衛星追尾システムを用いて極軌道気象衛星 NOAA から送信されている気象データを受信する。

1.1 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

気象衛星には大きく分けて二つの種類がある (図 1.1 参照)。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。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。日本の静止軌道衛星は、ひまわり (MTSAT-1R) と呼ばれている。静止軌道気象衛星の詳細に関しては、実習課題 2 に置いて解説を行う。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。この実習では、低高度極軌道を周回する NOAA 衛星によって取得された気象画像データを受信する。以下では、この衛星の概要を述べる。

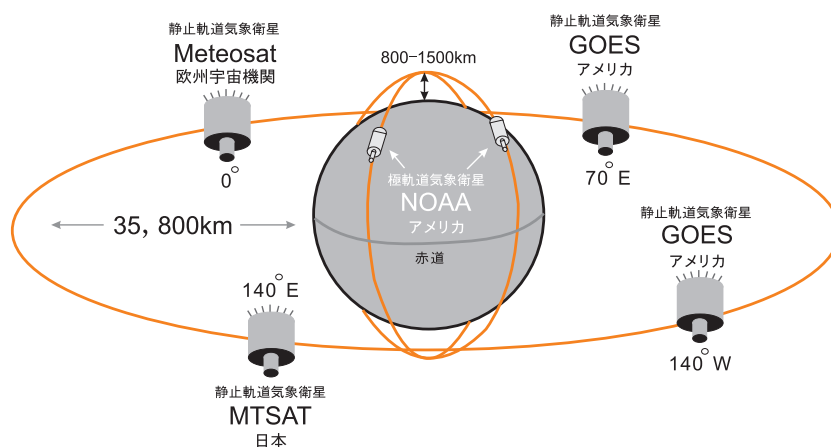


図 1.1 気象衛星の軌道概念図

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。各国の静止気象衛星群と相補的に機能して宇宙からの全球観測を行っている (図 1.1 参照)。NOAA 衛星は常に 2 機以上 (2009 年 8 月現在: 5 機) が稼働している。

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 800–850km、軌道傾斜角 約 98 度、周期 約 102 分、回帰周期 9 日の軌道をとる。軌道高度の低い NOAA 衛星ではより高精度な地上走査が可能である。二番目の特徴は、多数の機器が搭載されていることである。NOAA 衛星には AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer)、TOVS (Torus Operational Vertical Sounder) 等のセンサが搭載されており、それらの観測機器は、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。気象業務以外にも NOAA 衛星は、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、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。

気象衛星 NOAA の周回軌道・運用状況概要

NOAA 衛星の軌道は、真円に近い太陽同期極軌道で、軌道高度は 849km (PM orbit) と 810km (AM orbit)、軌道傾斜角度は 98.9 度と 98.7 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る。地球探査衛星はこの軌道を取ることが多い。以下の表 1.1 に、現在稼働中の NOAA 衛星の運用状態を示す。

	NOAA-12	NOAA-15	NOAA-16	NOAA-17	NOAA-18
打ち上げ	1991/05/14	1998/05/13	2000/09/21	2002/06/24	2005/05/20
軌道高度	804 km	807 km	849 km	810 km	854 km
軌道傾斜角	98.7°	98.5°	98.9°	98.7°	98.7°
公転周期	101.1 min	101.1 min	102.1 min	101.2 min	102.12 min
運用状態	standby (AM)	backup (AM)	primary (PM)	primary (AM)	backup (PM)

表 1.1 現在稼働中の NOAA 衛星の運用状態

1.2 人工衛星追尾システムの概要

菅平宇宙電波観測所にある人工衛星追尾システムには、マニュアル追尾システムと自動追尾システムの 2 系統がある。この 2 系統の追尾システムは異なるアンテナを用いる。実習では、自動追尾システムをバックグラウンドで稼働させながら (自動でアンテナが動くので特段の操作をせずとも受信を行うことはできるが、画像取得のソフトウェアを走らせておく必要がある: 1.3 参照)、マニュアル追尾システムで手動追尾を行う。マニュアル追尾システムで操作するのは、UHF アンテナ (観測所の入り口にある大きなパラボラアンテナ) と VHF アンテナ (観測棟の屋上にある 9 エレメント Yagi x 4 アンテナ) である。この 2 つのアンテナが諸君のアンテナ操作によって動くのである。マニュアル追尾システムの詳細については、ここではその詳細を解説しない。実際にコンソール (操作卓) で手ほどきを受け、操作方法に習熟してほしい。

1.3 NOAA 衛星気象画像データの取得 (自動追尾システムによる)

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)

を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 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。

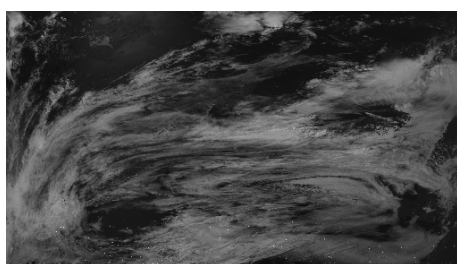


図 1.2 NOAA 衛星気象画像 (可視波長域)

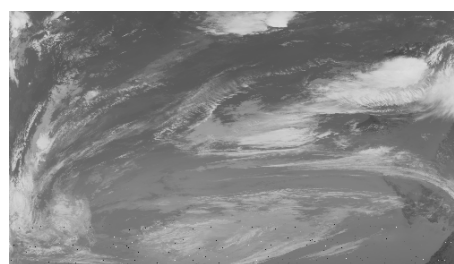


図 1.3 NOAA 衛星気象画像 (赤外波長域)



図 1.4 NOAA 衛星気象画像 ($3.8\ \mu\text{m}$)

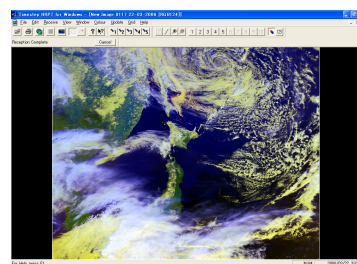


図 1.5 NOAA 衛星疑似カラー画像

1.4 実習課題

1. 手動追尾時の操作を記録したログを基に、各グループの受信状況を評価せよ。
2. 手動追尾受信データに格納されているパラメータ (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評価せよ (具体的な方法については実習時に指示がある)。

★ 参考: マニュアル追尾受信システムブロックダイアグラム

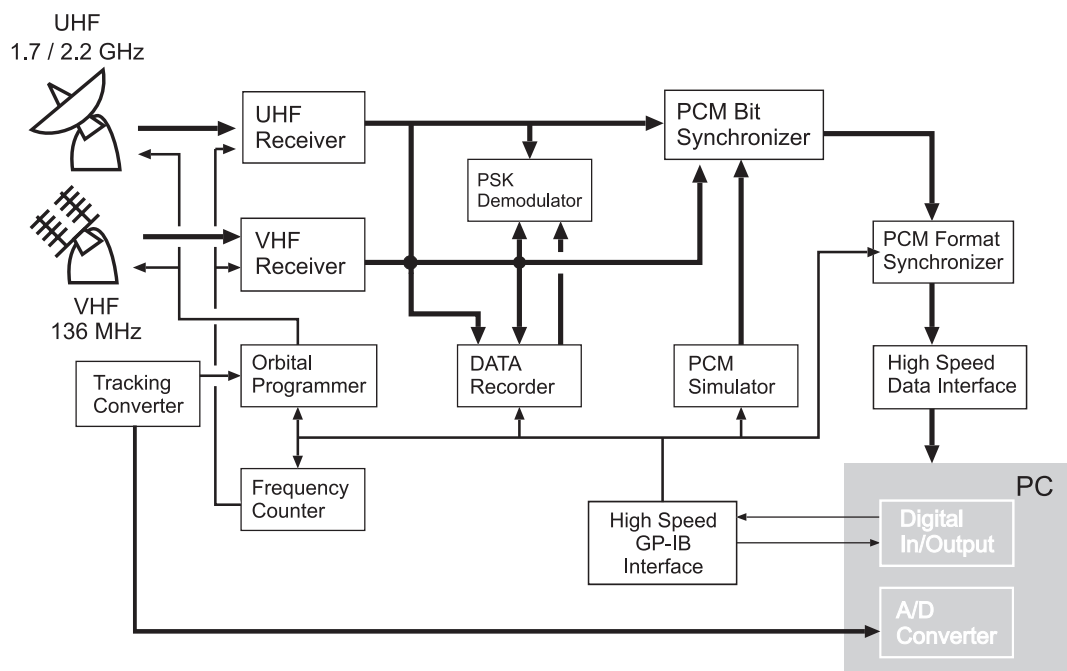


図 1.6 人工衛星追尾システムブロックダイアグラム

★ 参考: アンテナ仕様 (マニュアル追尾で使われている UHF, VHF アンテナ)

VHF Antenna	Type	Arrays of 9-element Yagi
	Frequency range	136-138 MHz
	Beamwidth	20 deg at -3 dB
	Polarization	right- and left-handed circular
	Ant. Gain	19 dB
	Pre-amplifier	Gain: 34 dB Noise Figure: 1.5 dB
	Azimuth travel	740 deg (+/- 370 deg from North)
	Slew rate	15 deg/s
	Pedestal system accuracy	static error: 0.05 deg velocity error: 0.003 deg/deg/s
UHF Antenna	Type	Primary-focused parabolic antenna
	Frequency range	1.6-2.2 GHz
	Beamwidth	3 deg at -3 dB
	Polarization	right-handed circular
	Ant Gain	40 dB
	Pre-amplifier	Gain: 20dB Noise Figure: 2dB
	Azimuth travel	740 deg (+/- 370 deg from North)
	Slew rate	15 deg/s
	Pedestal system accuracy	static error: 0.05 deg velocity error: 0.003 deg/deg/s

実習課題 2

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。

2.1 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。

2.2 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を呼び出す。データは Z directory に入れられている。ファイル名は、取得日時を表す New Image 0050 10-08-2011 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: $3.8\ \mu\text{m}$ 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 $10.5\ \mu\text{m}$ - $11.5\ \mu\text{m}$)
- 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 昼に受信を行ったグループは、チャンネル 4 とチャンネル 1 のデータを比較。チャンネル 4 (赤外) の画像では明確ではないが、他のチャンネル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 2.4 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3で用いる。

2.3 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_2011mmddhhff 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。2011 の次の mm, dd, hh, ff は、それぞれ月、日、時間、分である。08201120 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」を選べると画像が色づけされる。
- ⑥ 2.2 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 2.2 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してもよい。後ろの 3.2 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/>。

2.4 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の**合計 3 つ**をファイルに取り込み（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 2.1 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。

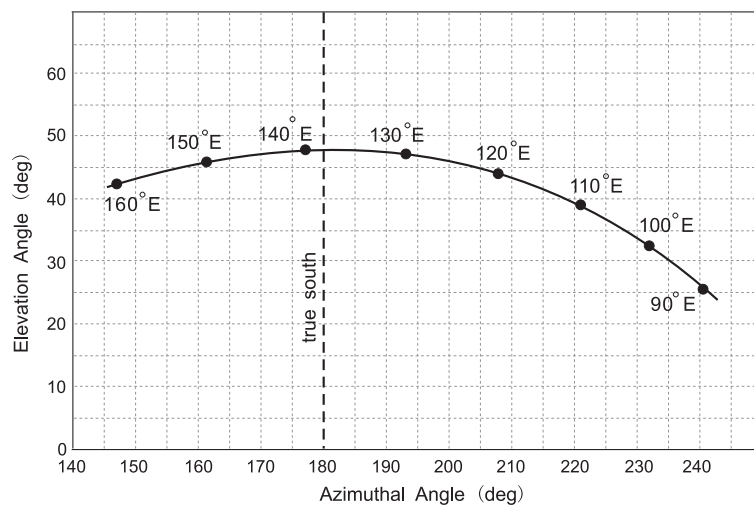


図 2.1 菅平宇宙電波観測所から見た静止軌道衛星の方位角・仰角図

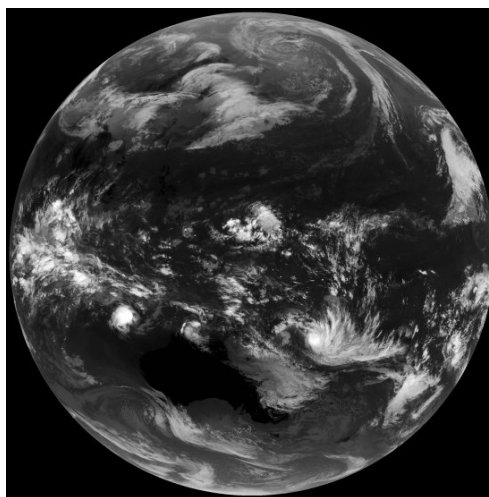


図 2.2 ひまわり 6 号全球可視画像

実習課題 3

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。

3.1 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。

3.2 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 3.1 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)。

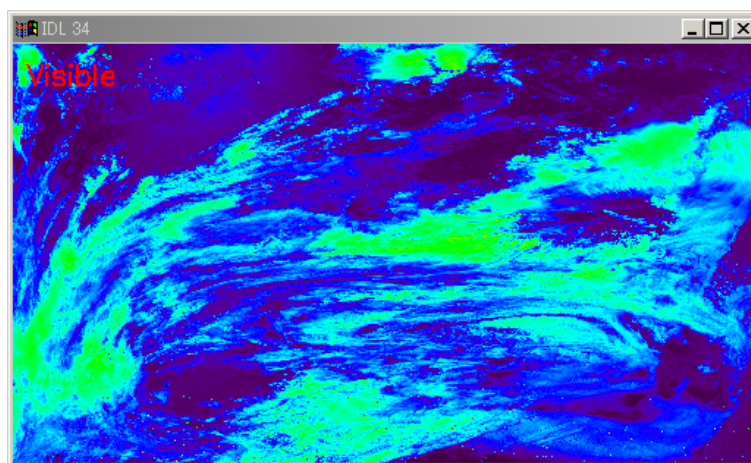


図 3.1 可視画像をカラーテーブル 39 番でプロットしたもの

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 3.2) 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。

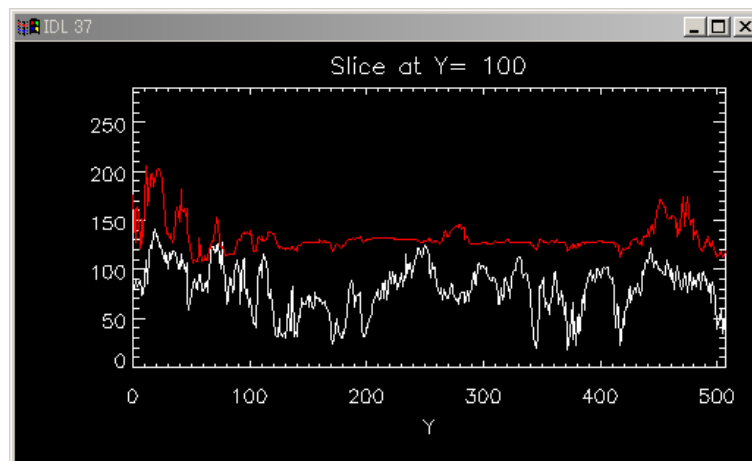


図 3.2 $y=100$ における可視画像のスライスの上に、赤外のスライスを赤 (col=250) で重ね書きしたもの

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。

$$R = \frac{\sum_{j=0}^{N-1} \sum_{i=0}^{M-1} (f(i, j) - \bar{f})(g(i, j) - \bar{g})}{\sqrt{\sum_{j=0}^{N-1} \sum_{i=0}^{M-1} (f(i, j) - \bar{f})^2} \sqrt{\sum_{j=0}^{N-1} \sum_{i=0}^{M-1} (g(i, j) - \bar{g})^2}} \quad (3.1)$$

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 (C 科と E 科専門選択科目受講者のみ)

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。

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

ウイ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: ウイ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: ウイ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。

3.3 実習課題

★ 総合文化上級科目の受講者

可視と赤外の両方の画像にタイトルとして、アルファベットで書いた自分の名前を入れたものを提出せよ。さらに、それぞれの画像を 4 等分 (1 ピクセルの差は可) し、対応する領域で相関係数を求めよ。また、相関係数の最も低い領域の画像を見て、相関を下げている原因を考察せよ。画像を適宜縮小するなどして、A4 の紙 1 枚のレポートにすること。

★ C 科と E 科専門選択科目受講者

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 2 の内容も考慮して、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。

★ 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/>。

実習課題 4

放送衛星受信実習

目的

放送衛星受信アンテナの仰角および方位角を最適受信状態に設定し、放送衛星電波の受信・解析を行う。

4.1 放送衛星概論

放送衛星の基本的な機能は通信衛星と同様、搭載した中継器 (トランスポンダ) で地上から送信 (アップリンク) した電波を受信したのち別な周波数に変換し、地上に向けて再送信する (ダウンリンク) ことである。通信衛星との違いは送信出力や使用する周波数帯、カバーする地域、所有者や法的な位置づけなどに見られる。通信衛星では C バンド (6/4GHz) Ka バンド (30/20GHz) などがよく用いられ、放送衛星では Ku バンド (14GHz/12GHz) が用いられる (周波数はアップリンク/ダウンリンクの周波数帯)。但し Ku バンドは降雨時の減衰が著しいため赤道地域では影響の少ない 2.6GHz 帯も利用される。直接放送の場合、個別受信のためアンテナの大きさに制約があるため、Ku バンドにおいて 100-200W 程度の高出力が要求されている。

静止衛星のカバー範囲は本来は概ね地球の半分程度であるが、国際通信に用いられ、特定の通信事業者間の通信に限られる通信衛星と異なり、不特定多数の視聴者が受信できる直接放送衛星においては、政治的・文化的事情から近隣の国に対するダウンリンクの漏洩 (スピルオーバー) を厳しく制限する必要がある。日本の放送衛星では、スピルオーバーを最小限に抑制するため、アンテナの形状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により所有され、その目的もそれぞれの業務に限定されたが、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。現在、日本では BSAT-1 という衛星によって BS アナログ放送 (NHK BS-1, BS-2, NHK ハイビジョン放送, WOWOW)、BSAT-2 という衛星により BS デジタル放送が行われている。この実習では、BS アナログ放送の受信を行う。

4.2 アンテナ方向の決定

衛星放送電波の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した上でアンテナを設置する必要がある。図 4.1 は、菅平宇宙電波観測所から見た静止軌道衛星の方位角・仰角を表したものである。この実習では、BSAT-1 衛星 (静止軌道上 東経 110 度で運用中) の電波を受信する。

図 4.1 から、BSAT-1 衛星は、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 (図において、方位角は真北から東回りに取ってあることに注意)。菅平では地磁気偏角 (方位磁針が指す北と地理的な真北のずれ) が真北より西に 7 度傾いているため、磁北方向を基準にするならば、方位角は C 度となる。

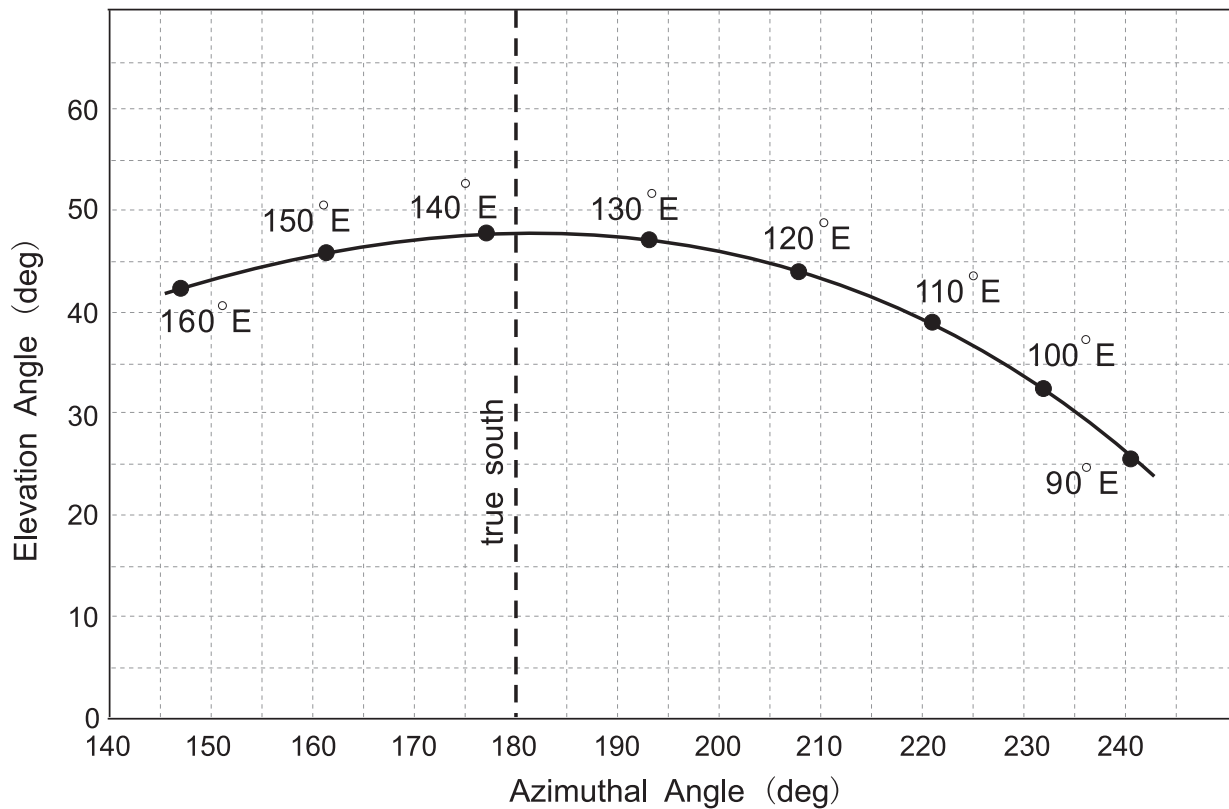


図 4.1 菅平宇宙電波観測所から見た静止軌道衛星の方位角・仰角図

4.3 使用機器およびアンテナ設置手順

4.3.1 使用機器

★ SONY BS アンテナ SAN-37K2SET

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 度
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 度 - +50 度 C
耐風速	50 m/s
電源電圧	DC15V (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

★ SONY トリニトロンカラーテレビ KV-32FW3

4.3.2 アンテナ設置手順

- ❶ BS チューナーなどの電源を入れる。
テレビの BS チューナー設定で、BS コンバーター用電源を「入」にする。
- ❷ 仰角固定ボルト (図 4.2 参照) をスパナでゆるめ、アンテナの向きを仰角方向に変更可能にする。
- ❸ 仰角固定ボルトを動かし、仰角を A 度に合わせる (図 4.3 参照)。

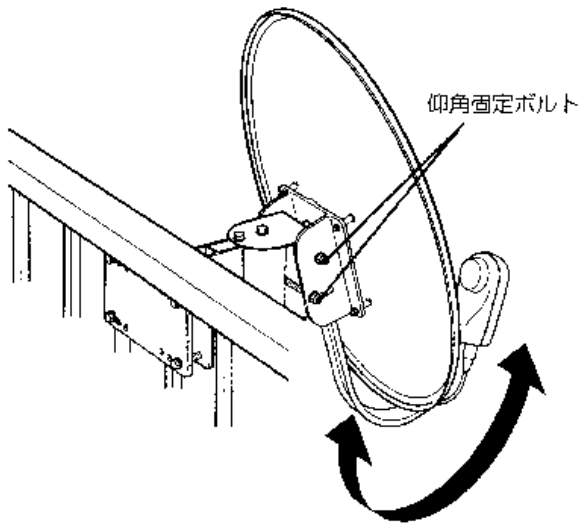


図 4.2 仰角固定ボルトの位置

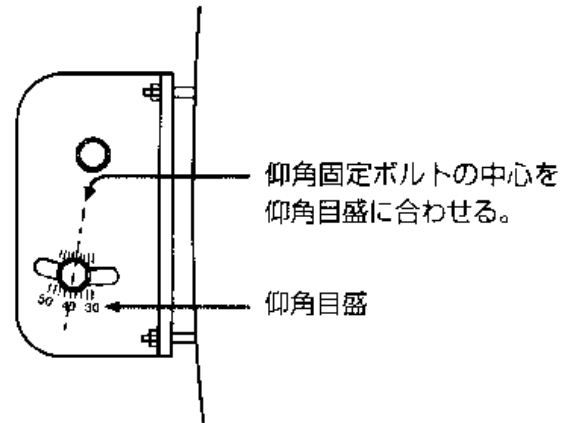


図 4.3 仰角固定ボルトの調整方法

- ❹ 方位角固定ボルトをスパナでゆるめ、方位角方向の調整を行う (図 4.4 参照)。

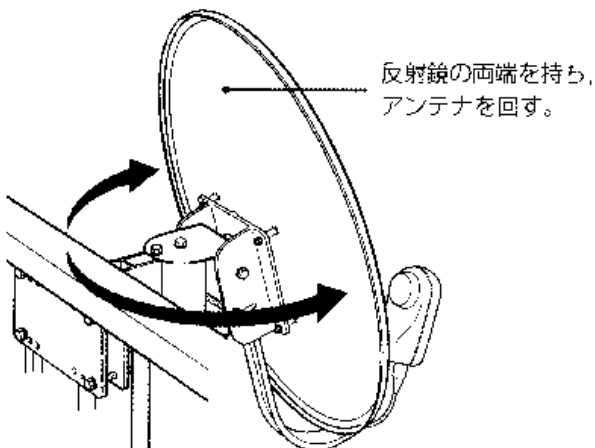


図 4.4 方位角設定方法

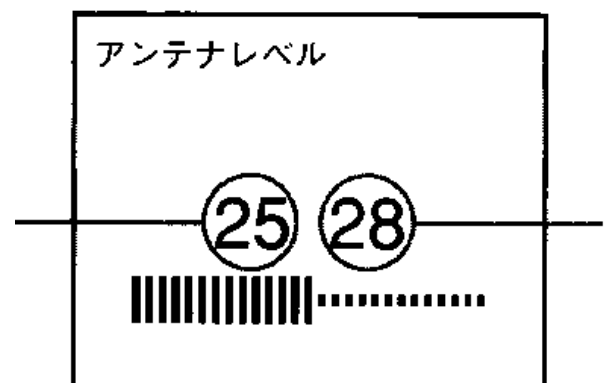


図 4.5 アンテナレベル表示例

仰角・方位角の調整では、テレビ画面に表示されるアンテナレベル (図 4.5) を参照しながら行うとよい。

右の数値：今まで入ってきた電波の中で最大のアンテナレベル。

左の数値：現在のアンテナレベル。

左の数値が、右の値に近づくようにアンテナの方向を調整する。

- ⑥ 仰角・方位角を微調整しながら、仰角固定ボルトと方位角固定ボルトをしっかり締める。

テレビ画面のアンテナレベルが変わらないことを確認しながら締める。変わったら、③ から ⑤ の方法で調整し直してから締めること。アンテナの角度・方向が動かないようにボルトは確実に締めるように。

4.4 放送衛星送信電波スペクトル測定

図 4.6 のように、衛星受信用テレビの直前で、高周波信号を分配器によって 2 分割する。このうち、電源側を衛星受信用テレビに接続し、もう一方をスペクトラムアナライザ TR4131 (図 4.7) に接続する。



図 4.6 分配器による高周波信号の分配

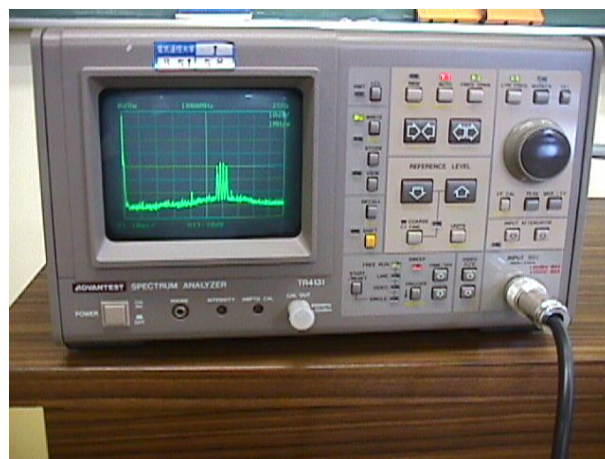


図 4.7 スペクトラムアナライザ TR4131

周波数範囲を 0-2 GHz とすると、スペクトラムアナライザ TR4131 の画面にスペクトルが得られる。このスペクトルの中央付近に存在する数本連続したスペクトルが、放送衛星 BSAT-1 の 5 (WOWOW: 11.804 GHz)、7 (NHK: 11.843 GHz)、9 (NHK Hivision: 11.881 GHz)、11 (NHK: 11.919 GHz) の各チャンネルに対応している。また、この両側に衛星デジタルのチャンネルが付加されている。

これらのスペクトルの中心周波数およびおよその帯域幅を、以下の手順に従って測定する。

- ① 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。
- ② FREQ SPAN ボタンを押して、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する。
- ③ 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。
- ④ 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。
- ⑤ 次に、画面右端の最上部に表示された周波数を読みとり、これを 10 分の 1 にした値が、画面の横目盛り 1 つの間隔になる。
- ⑥ 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。
- ⑦ 画面の各々の山の中央周波数を、スペクトル周波数として読みとる。
- ⑧ その山の頂部から 20 dB 下がった部分の周波数幅を、帯域幅として読みとる。
- ⑨ 連続して存在する 4 つのスペクトル、および衛星デジタルの 2 つのスペクトルの合計 6 つ全てについて、スペクトル周波数と帯域幅を測定する。
- ⑩ 衛星送信周波数からスペクトル中心周波数を引いて、アンテナのダウンコンバータ局部発振周波数を求める。

4.5 実習課題

1. 放送衛星の真方位角・仰角を図から求めよ。
2. 磁気偏角補正をして、磁南からの方位角を求めよ。
3. アンテナを取り付け調整したときの最大強度表示値を測定せよ。
4. 最大強度方向の予測値と実測値を比較せよ。
5. 気象衛星「ひまわり」の静止位置は 140° E である。この真方位角・仰角を求めよ。
6. 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。また、全スペクトル帯域幅、各チャンネルのスペクトル中心周波数および帯域幅を測定せよ。
7. 衛星放送送信周波数からスペクトル中心周波数を引いて、アンテナのダウンコンバータ局部発振周波数を求めよ。また、求めた局部発振周波数が仕様と一致しているかを確かめること。

MEMO

実習課題 5

GPS 衛星受信実習

目的:

GPS 衛星システムを利用して、受信点の時刻や位置を精密に測定する。

5.1 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 27 機 (うち 3 機は予備機) 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。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。

5.2 GPS 受信システム操作方法 (移動用)

5.2.1 ポータブル GPS 受信機操作方法

Empex map21 (FG-212) という GPS 受信機を用いる。この受信機は、GPS システムによって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 GPS 衛星の一覧を表示することも可能となっている。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行う。以下、操作手順を概説する。

1. 起動

電源を長押し → メニュー画面表示。

★ 最下部に電池残量が表示されている。残量に注意し、測定途中に受信機が停止しないようにする。



2. 衛星位置画面起動

カーソルキーを押し、“衛星位置”に移動。ここで実行キーを押す。



3. 衛星位置の立体表示

現在、受信可能な衛星を全て立体表示し、この中でデータを受信している衛星は、立体表示上で塗りつぶされている。このときの衛星番号毎の信号強度が下に示されている。信号強度グラフで塗りつぶされている衛星からデータを受信している。

★ 円は、下からそれぞれ仰角 0, 20, 40, 60, 80 度を表す。

★ 受信状態は、未受信 → 2D → 3D

★ EPE は、水平位置誤差を表す。



4. 衛星位置の平面表示

上下カーソルで立体表示と平面表示を行き来できる。データを受信している衛星は、平面表示上で塗りつぶされている。また、このときの衛星番号毎の信号強度が下に示されている。また、信号強度グラフで塗りつぶされている衛星からデータを受信していることを示している。



5. 現在位置画面起動

カーソルキーを押して、画面上の位置を“現在位置”に移動し、実行キーを押す。



6. 現在位置表示画面

現在受信している場所の位置情報として住所・緯度経度・高度、また、移動体情報として移動速度・最高速度・移動距離が表示されている。

★ カーソルキーを用いて最高速度または移動距離にカーソルを合わせ、ここで実行キーを押すと値をリセットできる。



7. 現在位置・移動経路地図上表示

カーソルキーを押して、画面上の位置を”マップナビ”に移動し、ここで実行キーを押す。ズームキーは表示画面の拡大・縮小に使用する。



8. マップナビ画面

現在受信している場所の位置を地図上に表示する。また、移動体情報として移動方位・移動速度を表示している。最上部には、現在の時間も表示される。

★ 画面の拡大縮小は、ズームキーを押して行う。

★ 画面をスクロールするには、スクロールキーを使う。



9. データ編集画面起動

カーソルキーを押して、画面上の位置を”データ編集”に移動し、ここで実行キー。さらに”軌跡編集”に移動し、実行キー。”使用中の軌跡”が選択し実行キーを押して削除。これで、新たな”使用中の軌跡”を作成することができる。ここから各班別の移動軌跡の記録がスタートする。



10. 軌跡編集画面起動

観測所に帰ってきたら、カーソルキーを押して、”データ編集” → ”軌跡編集”に移動し、ここで実行キーを押す。

★ 使用中の軌跡が表示され、このときの有効ポイント数も表示される。

★ 実行キーを押すと、「保存」か「削除」を聞いてくるので、「保存」にカーソルを合わせ、実行キーを押す。

★ ここで、保存データ名を入力する。(実習グループ番号を入力する。)



11. 終了

電源キーをしばらく押して、終了画面がでるまで待つ。



5.2.2 取得データ処理方法

パソコンと受信機をシリアルケーブルで接続し、Windows の HyperTerminal を使用して、データを抽出する。その後、変換プログラムを用いて、データ解析に適したフォーマットのデータファイルを作成する。

受信機からのデータの読み出し方法 (参考: ポケナビマニュアル 211 ページ)

- ① デスクトップの gpsXXXX (ここで XXXX は実習の実施年度) を開き、さらに班別のフォルダを開く。
- ② データ読み出し用 PC のシリアルポートにケーブルを接続する。
- ③ POKE-navi.ht のアイコンをダブルクリックして開く。
- ④ HyperTerminal が自動的に起動する。
- ⑤ '転送' → 'テキストのキャプチャ' を選択し、保存先のファイル名を入力。ただし、出力先のフォルダは gpsXXXX 以下の班別のフォルダにすること。
- ⑥ ポケナビのメインメニューからメイン設定で GPS/PC 接続を選択
- ⑦ 次の画面で上から順に以下の様に設定

PC へ軌跡データをNMEA 形式でケーブルで出力

用いるポケナビの機種 (MAP21 か MAP21EX か) によってこの選択項目は多少異なるが、最後に出力する軌跡の名前 (グループ名で指定したもの) を選択する必要がある。
- ⑧ '転送' → 'テキストのキャプチャ' → '停止' を選択し、データの書き出しを終了。
- ⑨ 保存されたデータをメモ帳で確認。

データ変換方法

- ① プログラム map21.exe をダブルクリックする。
- ② ポケナビの機種名を選択 (MAP21、MAP21EX のどちらか)

** Specify Receiver (1:MAP21, 2: MAP21EX):
- ③ 先ほど保存した生データファイルのファイル名を入力

** MAP21 data file name: (e.g. map21.dat)
- ④ AAAAAA.GGA、AAAAAA.RMC などというファイルが生成される (フォーマットは章末を参照のこと)。
また、取得データの受け渡しについては、次のページの記述を参照のこと。

5.3 GPS 受信システム操作方法 (定点測定用)

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。

5.3.1 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

5.3.2 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。)

5.3.3 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/>。

5.4 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、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。

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

ポケナビの画面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。(オプション: 可能であれば定点測定について、オシロスコープ画面で、他の装置で使用している時計との比較を行う。この結果を記せ)

★ 変換後データのフォーマットについて

出力データファイルには以下の 2 種類がある。基本的に、拡張子が GGA のほうを用いる。

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

AAAAAA.RMC: ファイル 年月日、時刻、緯度、経度、

GGA ファイルフォーマット

```
hh mm ss NN nn.nnn   EEE ee.eee   i j aa.aa hhhh gg
10 17 49 36 31.395 N 138 19.059 E 1 7 1.74 1282 39
10 17 50 36 31.395 N 138 19.060 E 1 7 1.74 1282 39
10 17 51 36 31.395 N 138 19.061 E 1 7 1.74 1283 39
10 17 52 36 31.395 N 138 19.062 E 1 7 1.74 1283 39
10 17 53 36 31.395 N 138 19.063 E 1 7 1.74 1284 39
```

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。

RMC ファイルフォーマット (参考)

```
YYYY MM DD hh mm ss   degN   degE
-----
2004  8  9  12 45 49  36.52017 138.32104   .0   .0 14
2004  8  9  13 25 36  36.52017 138.32104   .0   .0 1B
2004  8  9  13 49 29  36.52017 138.32104   .0   .0 1F
```

★ Google Earth について

配布した実習課題用のマップは Google Earth 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>

課題では、取得データを手書きでマップの上に描いて欲しいが、興味があれば Google Earth の上に直接移動経路を描くこともできる。まず Google Earth を自分のコンピュータにインストールする。次に、web 上で提供されている KML generator を用いて、緯度・経度情報を kml という形式のファイルに変換する。この kml ファイルを Google Earth で開けば、移動経路がマップ上に表示される。興味があれば試してみたい。

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

実習課題 6

衛星軌道計算実習

目的

極軌道 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 (アンテナ操作手順) の策定を行う。

6.1 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。

6.1.1 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、ELNOAA14.DAT, ELNOAA15.DAT, ELNOAA16.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 1989    9    14    0    0    0    30 5000    1
Line-3 1989    9    15    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 2004    8    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: kk=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 2004      8      8      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。**Insert** キーで上書きモードにしてから注意深く編集を行うこと。また、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)。

6.1.2 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。

6.1.3 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 6.1 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 6.2 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。

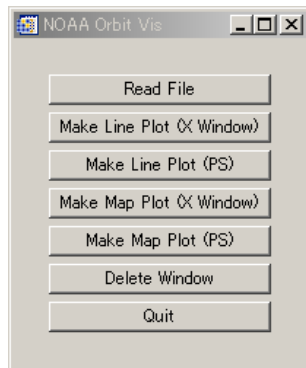


図 6.1 メニューウィンドウ

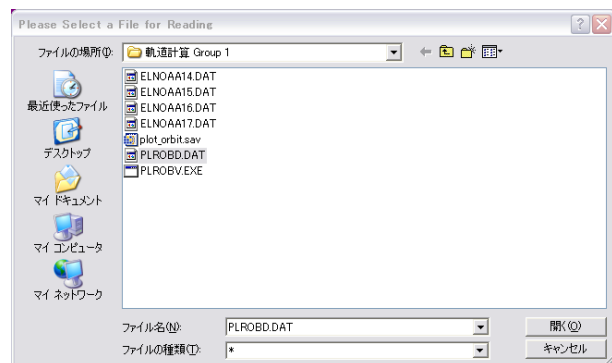


図 6.2 軌道計算結果ファイル選択画面

- 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 6.3 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 6.4 参照)。

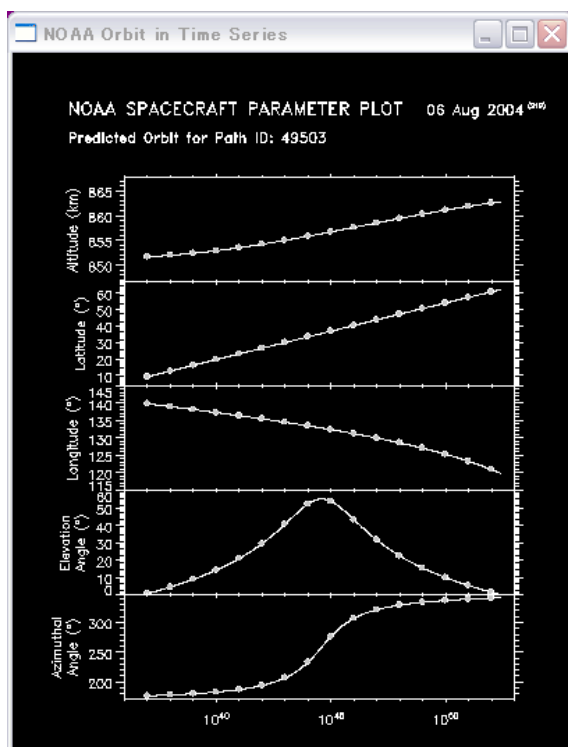


図 6.3 予測軌道ラインプロット出力例

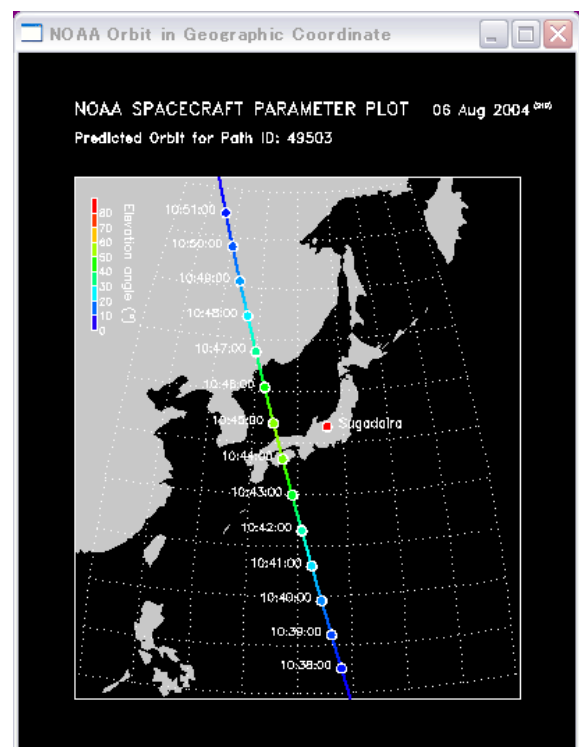


図 6.4 予測軌道マッププロット出力例

- ⑦ **Make Line Plot (PS)** を押すと図 6.5 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 6.6 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

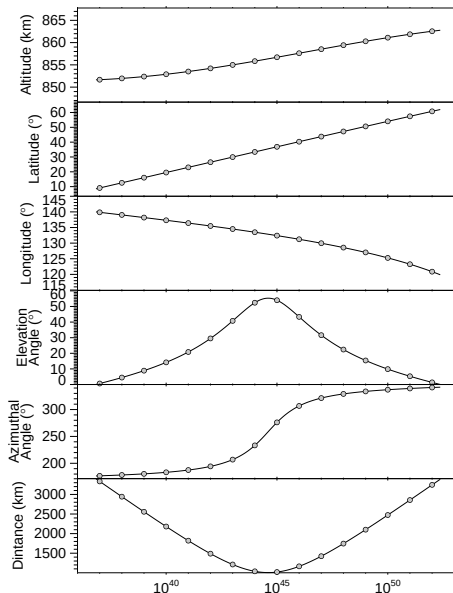


図 6.5 予測軌道ラインプロット印刷用ファイル出力例

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

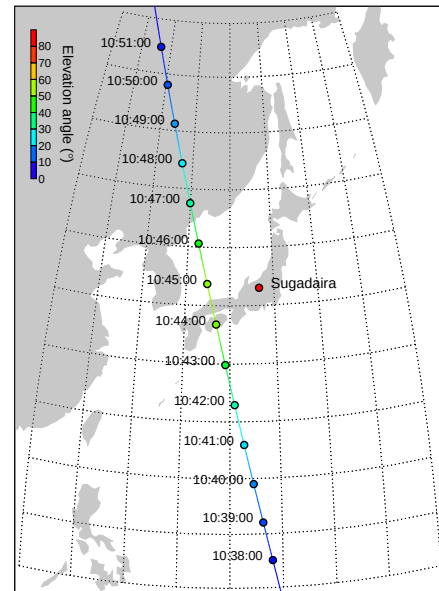


図 6.6 予測軌道マッププロット印刷用ファイル出力例

6.1.4 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。

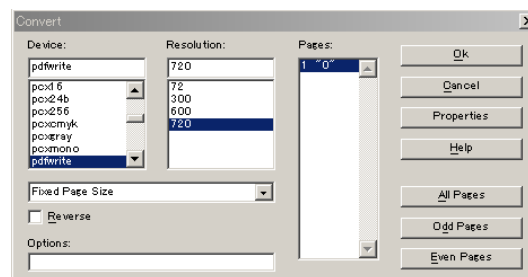


図 6.7 PDF 保存用ダイアログ

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/>。

6.2 実習課題

1. 今回の実習で受信した (もしくはする予定の) NOAA 衛星の可視時間を選び、この時間内の詳しい衛星位置データを計算し、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 (計算間隔は 1 秒が望ましい)。
2. 衛星追尾計画の策定を行え。練習パスと本番パスについて、3 人ずつ分担して行うこと。

具体的手順:

- ① 計算間隔を 30 秒程度に設定して軌道計算を行い (計算回数もそれに合わせて変更すること)、計算結果の数値データをメモ帳で開く。
- ② 次のページにある UHF 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。
- ③ 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・方位角にアンテナを向け、衛星が見え始めるのを待ち受けることになる (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)。
- ④ 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 (衛星の動きが速くなったときに、迅速なアンテナ操作が行えるように)。
- ⑤ 各自の運用計画を、班全体で照合し、間違いがないかを確認。その後に、班としての運用計画をまとめる。

★ 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
49503 2004/ 8/ 6 10:38: 2 * 851.97 12.69 139.00 4.60 178.35 2929.9 B D
49503 2004/ 8/ 6 10:38: 3 * 851.98 12.75 138.99 4.66 178.38 2923.4 B D
49503 2004/ 8/ 6 10:38: 4 * 851.98 12.80 138.97 4.73 178.41 2917.0 B D
49503 2004/ 8/ 6 10:38: 5 * 851.99 12.86 138.96 4.80 178.44 2910.4 B D
49503 2004/ 8/ 6 10:38: 6 * 851.99 12.92 138.94 4.87 178.47 2903.9 B D
49503 2004/ 8/ 6 10:38: 7 * 852.00 12.98 138.93 4.94 178.51 2897.5 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 (°)
ddd.d	距離 (km)		

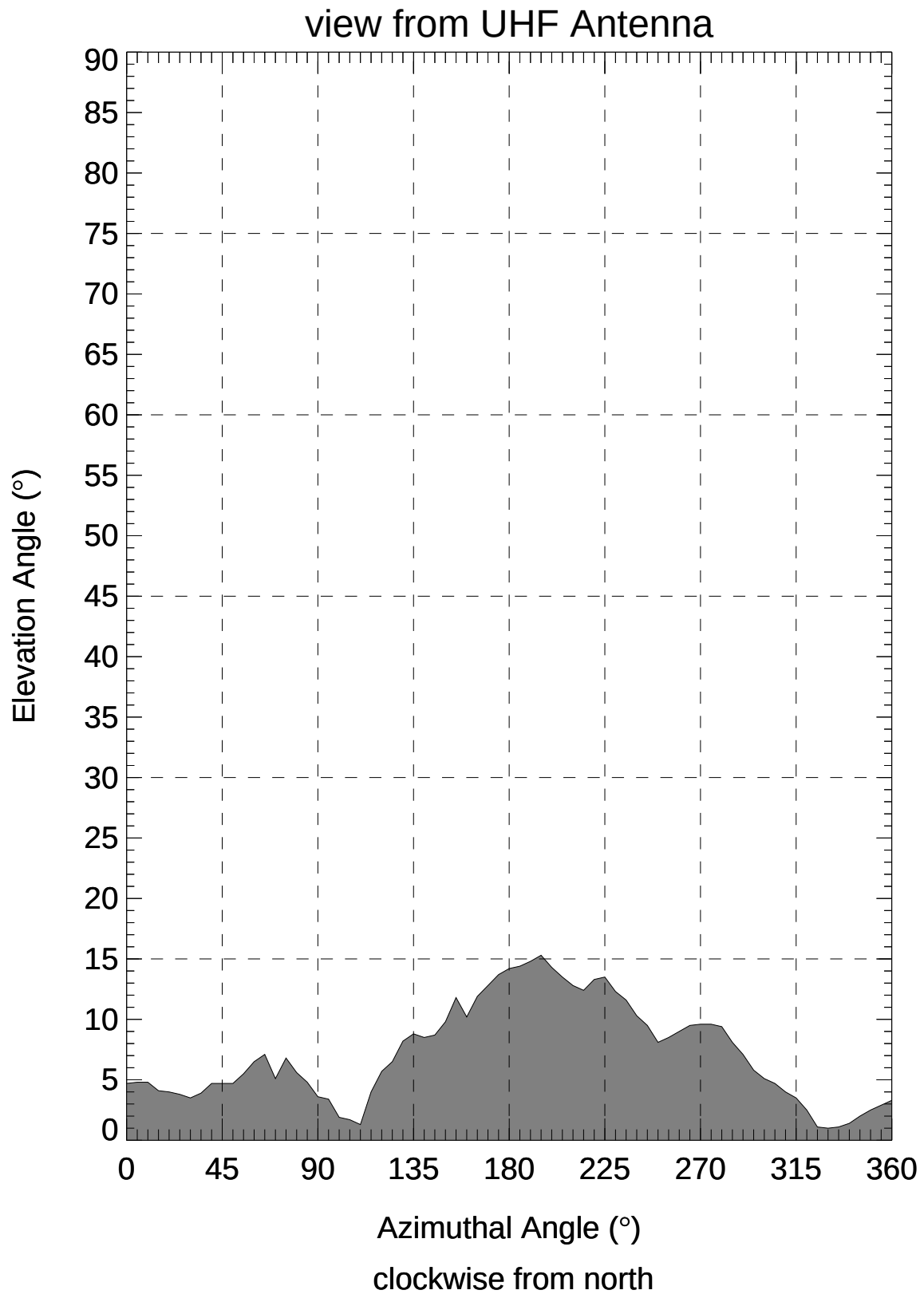


図 6.8 UHF アンテナから見える稜線 (横軸: 方位角, 縦軸: 仰角)

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。

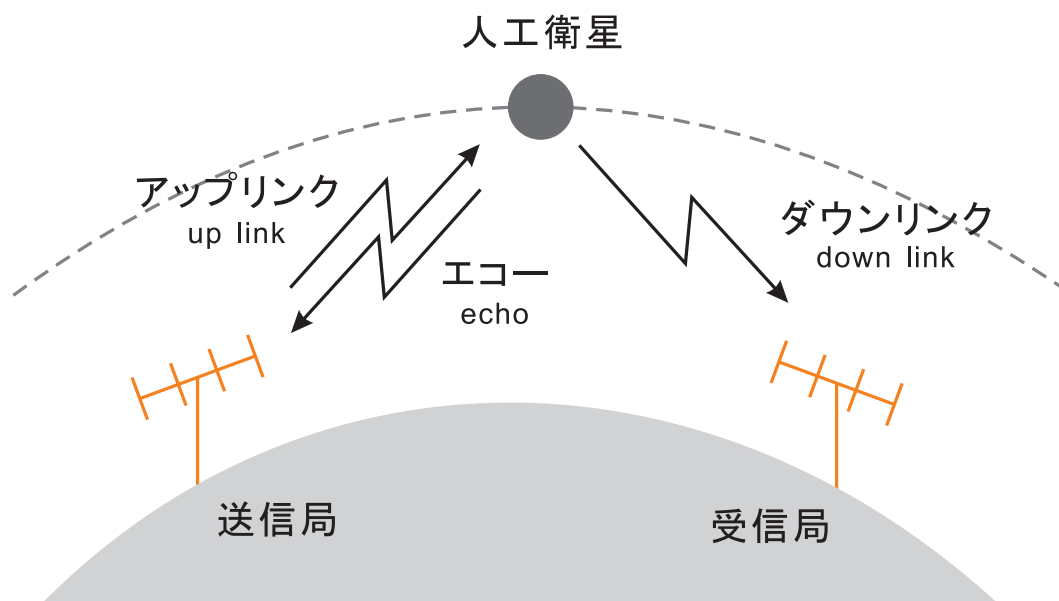


図 7.1 衛星通信の概念図

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)。

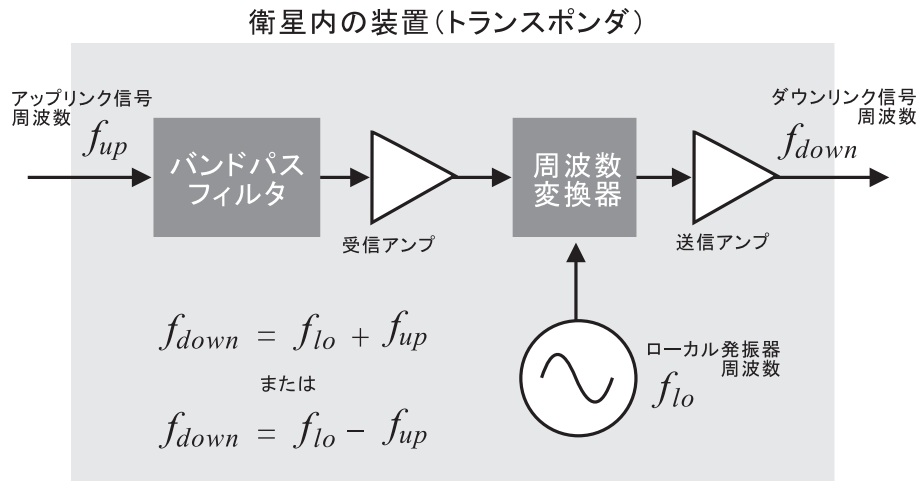


図 7.2 衛星内の中継装置 (トランスポンダ) の模式図

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 スイッチを押し。
- 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

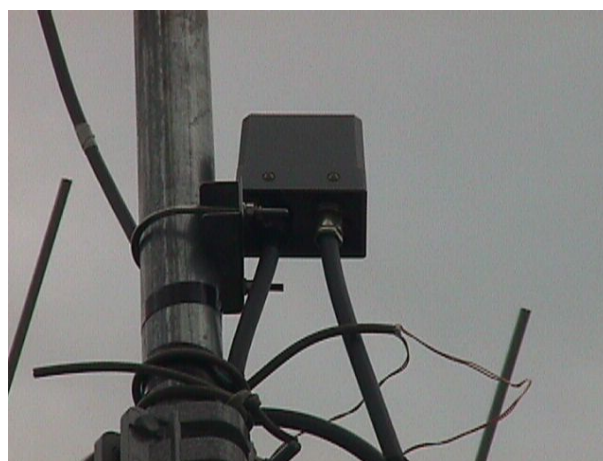


図 7.8 受信プリアンプ

方位角 α - テータ・仰角 θ - 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。

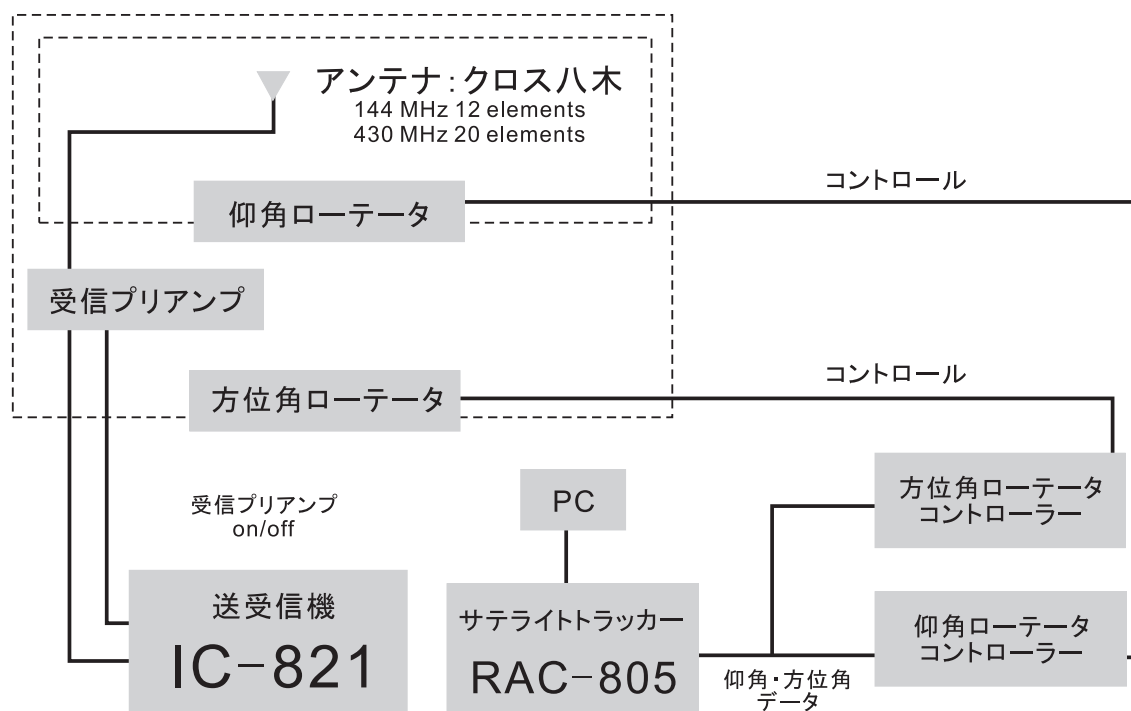


図 7.11 システム構成要素のブロックダイアグラム

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。

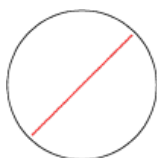
7.3.2 時間遅れの観測

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。

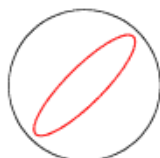
- ❶ 無線機をサテライトモードに設定して、衛星通信が出来る状態にする。
- ❷ アップリンク周波数とダウンリンク周波数を確認する。
(実際には、ドップラースhiftがあるので、ダウンリンク周波数を微調整する必要がある)
- ❸ 無線機のダウンリンク側の音声出力をオシロスコープに入力する。
- ❹ 無線機から信号が出される瞬間にオシロスコープのトリガが掛るようにした後衛星に向け信号を送る。
- ❺ トリガが掛ってから音声出力にダウンリンク信号が現れるまでの時間差をオシロで見て衛星までの距離を計算。

★ リサージュ図形とは ...

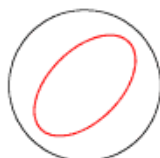
互いに直角方向に振動する二つの単振動を合成して得られる平面図形の総称。例えば、横軸に $\cos \theta$ 、縦軸に $\sin \theta = \cos (\theta + \pi/2)$ を与えると真円になる。また、位相差を 0 にすると直線になる。入力を一般的に考えて、横軸に $A \cos n\theta$ 、縦軸に $B \cos (m\theta + \gamma)$ とおき、入力振幅比 A/B 、周波数比 n/m 、および位相差 γ を任意に変化させると、リサージュ図形は下図のようになる。左から 4 つは周波数が同一の信号を入力した場合に現れるリサージュ図形であり、一番右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



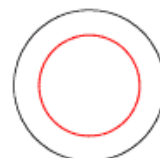
$$n/m = 1, \gamma = 0^\circ$$



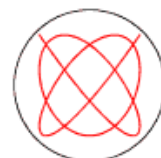
$$n/m = 1, \gamma = 30^\circ$$



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



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



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

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。