野辺山偏波計 (NoRP) 解析マニュアル
ver. 0.4

横山 央明

2000 年 10 月 17 日

1 はじめに

このマニュアルは、国立天文台野辺山太陽電波観測所の偏波計 (NoRP; Nakajima et al. 1985) と旧豊川偏波計 (TYKW; Torii et al. 1979; Shibasaki et al. 1979) とのデータ解析ためのマニュアルである。

このパッケージに関する質問や要望は以下に電子メールを送ってほしい。

`nsro-service@solar.nro.nao.ac.jp`

野辺山偏波計の最新の情報は国立天文台太陽電波観測所のウェブページを参照してほしい。URL は

`http://solar.nro.nao.ac.jp/norp/`

である。

1.1 前バージョンからの変更点

ver 0.3 からの変更

- 観測値をフィットしてスペクトルをもとめるプロシジャの追加
- 物理量を与えて観測されるべきスペクトルをもとめるプロシジャの追加
- イベントリスト
- 一日分データ (フレア時のぞく) の平均値

2 解析ソフトを使うには

ここで紹介する偏波計解析ソフトを使うには以下の設定が必要である。

(1) ようこう解析ソフトまたは「 SolarSoft 」のインストール

「 SolarSoftware (SSW)」をサブパッケージ「 Radio/NoRP 」を含めてインストールする。これ以外にも Yohkoh/SXT を含めることを強く推奨する。これらのソフトがインストールされていない場合はコンピュータ管理者に相談してほしい。「 SolarSoft 」の配布元は、`http://www.lmsal.com/solarsoft/` である。

(2) 個人環境の設定

環境設定ファイル~/.cshrc 中で

```
setenv␣SSW␣SSWのディレクトリ[1]
setenv␣SSW\_INSTR␣``norp''
setenv␣NORP␣\$\{SSW\}/radio/norp
```

[1] 野辺山観測所では `/sgi1/ssw`

source␣${NORP}/setup/setup.norp

を適当な箇所に書き加える。ただし環境変数${SSW}はサイトによって異なるので注意。また他の観測機器も同時解析する場合は

setenv SSW_INSTR ‘‘norp norh sxt’’

などとする。

3 実際の解析

3.1 解析の開始

この節で紹介するNoRH用IDLプロシジャはすべてSolarSoftware(SSW)に依存している。前節の設定を行った後実際に解析する際はSSW/IDLを立ち上げる。

unix% **sswidl <CR>**

3.2 データベース

3.2.1 イベントリスト

1990年から1992年5月までのイベントについてはデータベースがある('evx'データ)[2]。たとえば1991年6月9日UTのイベントのリストを表示するには

IDL> **norp_pr_evx,'1991-06-09' <CR>**

1991年6月5日UTから6月8日UTまでであれば

IDL> **st_day='1991-06-05' <CR>**
IDL> **ed_day='1991-06-08' <CR>**
IDL> **norp_pr_evx,st_day,ed_day <CR>**

17GHzで太陽放射束密度1000SFU以上のイベントのみの場合は

IDL> **norp_pr_evx,st_day,ed_day,criterion=1000 <CR>**

3.2.2 一日分データの平均値

一日分データのうち静穏時のみを選びだした平均値がデータベース化されている(1987年11月以後)。プリバーストの太陽放射を得たり、長周期変動の研究に役立ててほしい。

旧豊川偏波計(1・2・3.75・9.4GHz): 1987年11月から1994年2月まで
旧豊川偏波計(3.75GHzのみ): 1994年3月から1994年4月まで
旧野辺山偏波計(17・35・80GHz): 1990年3月から1994年2月まで
野辺山偏波計(1・2・3.75・9.4・17・35・80GHz): 1994年5月から現在も稼働中

ただし、35GHz(2400 SFU)と80GHz(9000 SFU)とは装置の設計上、静穏太陽放射束密度は固定された値になっているので注意。

読み込みは、たとえば1999年1月1日UTから6月30日UTまでであれば

IDL> **st_day='1999-01-01' <CR>**
IDL> **ed_day='1999-06-30' <CR>**
IDL> **norp_rd_avg,st_day,ed_day,timavg,fiavg,fvavg <CR>**

表示は、1GHzの場合

IDL> **utplot,timavg,fiavg(0,*) <CR>**

[2] 1992年6月以後のイベントについては電波ヘリオグラフのイベントリストを参照のこと

2GHz の場合

IDL> **utplot,timavg,fiavg(1,*) <CR>**

3.3 データのありか

3.3.1 キャリブレーション済データの XDR(IDL save) ファイル

野辺山太陽電波観測所アーカイブ (第 A 節参照) にキャリブレーションが済んで XDR (IDL save) フォーマットになったファイルがいくらか置いてある。読み込むには IDL コマンド `restore` を使う。まずはこれらを転送して解析するのをすすめる。定常観測については時間分解能 1 sec のデータが、重要なイベントについては時間分解能 0.1 sec のデータがおいてある。

IDL> **file=getenv('NORP_XDR')+'/1999/08/norp19990828_0056.xdr' <CR>**

IDL> **restore,file <CR>**

IDL> **help <CR>**

```
DAY             STRING    = '1999-08-28'
FI              FLOAT     = Array[7, 7590]
FIAVG           FLOAT     = Array[7]
FREQ            FLOAT     = Array[7]
FV              FLOAT     = Array[7, 7590]
FVAVG           FLOAT     = Array[7]
MVD             BYTE      = Array[7, 7590]
TIM             STRUCT    = -> ANYTIM2INTS Array[7590]
```

`freq` に観測周波数が GHz 単位で (ここでは 7 周波数 1・2・3.75・9.4・17・35・80GHz)、`tim` が観測時刻、`fi`・`fv` に放射束密度 I(R+L) 成分・V(R–L) 成分 (単位 SFU) が、`fiavg`・`fvavg` は一日分の静穏時の平均値がはいっている。また `mvd` は、各データ点が有効・無効をあらわす配列で有効なとき 1、無効なときゼロ。

3.3.2 生データ

野辺山太陽電波観測所アーカイブ (第 A 節参照) に生データの一部が公開されている。

3.4 生データの読み込み — 野辺山偏波計

野辺山偏波計データは、豊川偏波計との統合前の旧フォーマットと統合後の新フォーマットとがあるが解析プログラムは共通である。旧フォーマットデータには 1、2、3.75、9.4 GHz のデータは含まれていないのでこれらに関するオプションは無視される。

実際に読む込むには、読み込みたい日付 (JST) を指定して

IDL> **day='2000-4-23'**

IDL> **norp_rd_dat,day,mvd,tim,fi,fv,freq <CR>**

または、直接ファイル名を指定して

IDL> **file='./pl921102'**

IDL> **norp_rd_dat,file,mvd,tim,fi,fv,freq <CR>**

とする。`freq` に観測周波数が GHz 単位で (ここでは 7 周波数 1・2・3.75・9.4・17・35・80GHz)、`tim` が観測時刻、`fi`・`fv` に放射束密度 I 成分・V 成分 (単位 SFU) がはいっている。また `mvd` は、各データ点が有効・無効をあらわす配列で有効なとき 1、無効なときゼロ。

ある時間区間だけを選びだして読み込むには

IDL> **timerange=['1992-11-2 2:00','1992-11-2 4:00'] <CR>**

IDL> **norp_rd_dat,day,mvd,tim,fi,fv,freq,timerange=timerange <CR>**

この場合キャリブレーションは必要な区間だけに行われるので読み込みが速くなる。
ある周波数だけ読み込むには以下のようにする。たとえば 17GHz だけであれば

IDL> **rdfreq=[0,0,0,0,1,0,0] <CR>**

IDL> **norp_rd_dat,day,mvd,tim,fi,fv,freq,rdfreq=rdfreq <CR>**

1GHz と 9.4GHz とだけであれば

IDL> **rdfreq=[1,0,0,1,0,0,0] <CR>**

IDL> **norp_rd_dat,day,mvd,tim,fi,fv,freq,rdfreq=rdfreq <CR>**

つまり rdfreq の 7 つの各要素が順に 1・2・3.75・9.4・17・35・80GHz に対応しており値が 1 のときに読み込む。

3.5 生データの読み込み — 旧豊川偏波計

旧豊川偏波計データは、 1、2、3.75、9.4 GHz のデータが含まれている。
実際に読む込むには、読み込みたい日付 (JST) を指定して

IDL> **day='1992-11-2'**

IDL> **tykw_rd_dat,day,mvd,tim,fi,fv,freq <CR>**

とする。freq に観測周波数が GHz 単位で (ここでは 4 周波数 1・2・3.75・9.4GHz) 、tim が観測時刻、fi・fv に放射束密度 I 成分・V 成分 (単位 SFU) がはいっている。また mvd は、各データ点が有効・無効をあらわす配列で有効なとき 1、無効なときゼロ。
直接ファイル名を指定して

IDL> **file='./ty921102.01i' <CR>** ; 1GHz I 成分

IDL> **file0pa='./ty921102.0pa' <CR>** ; キャリブレーションデータ

IDL> **filestt='./ty921102.stt' <CR>** ; ステータスデータ

IDL> **tykw_rd_dat,file,file0pa,filestt,mvd,tim,data <CR>**

とすることもできる。この場合は、各周波数の I・V 成分のど ちらかしか一度に読めない。また生データのほかにキャリブレーションデータ・ステータスデータが含まれたファイル名も同時に指定しなければならない。
ある時間区間だけを選びだして読み込むには

IDL> **timerange=['1992-11-2 2:00','1992-11-2 4:00'] <CR>**

IDL> **tykw_rd_dat,day,mvd,tim,fi,fv,freq,timerange=timerange <CR>**

この場合キャリブレーションは必要な区間だけに行われるので読み込みが速くなる。
ある周波数だけ読み込むには以下のようにする。たとえば 2GHz だけであれば

IDL> **rdfreq=[0,1,0,0] <CR>**

IDL> **tykw_rd_dat,file,mvd,tim,fi,fv,freq,rdfreq=rdfreq <CR>**

1GHz と 9GHz とだけであれば

IDL> **rdfreq=[1,0,0,1] <CR>**

IDL> **tykw_rd_dat,file,mvd,tim,fi,fv,freq,rdfreq=rdfreq <CR>**

つまり rdfreq の 4 つの各要素が順に 1、2、3.75、9.4 GHz に対応しており値が 1 のときに読み込む。

3.6 グラフ表示

グラフ表示するには、

IDL> **mfreq=0 <CR>**

IDL> **norp_plot,mfreq,mvd,tim,fi <CR>**

ここで mfreq は、fi (複数の周波数分を含む) にはいっているデータのうち表示したいデータの周波数の

番号である。
別の周波数のデータを重ねるには

IDL> **mfreq1=1 <CR>**
IDL> **norp_plot,mfreq1,mvd,tim,fi,/over <CR>**

とする。直接指定して

IDL> **utplot,tim(where(mvd(mfreq,*))),fi(mfreq,where(mvd(mfreq,*))) <CR>**

とすることもできる。

3.7 スペクトル解析

複数の周波数データを組み合わせることでスペクトルを求めることができる。求まる量は α で定義は

$$F_\nu \propto \nu^\alpha$$

である。実際は α は全周波数帯にわたって一価ではなく、マイクロ波帯のスペクトルは次のような関数でだいたいフィッテングできる。

$$F_\nu = \widehat{F_\nu}\left(\frac{\nu}{\widehat{\nu}}\right)^{\alpha_{\rm tk}}\left\{1-\exp\left[-\left(\frac{\nu}{\widehat{\nu}}\right)^{\alpha_{\rm tn}-\alpha_{\rm tk}}\right]\right\} \approx \begin{cases} \widehat{F_\nu}\,(\nu/\widehat{\nu})^{\alpha_{\rm tk}} & \text{for } \nu \ll \widehat{\nu} \\ \widehat{F_\nu}\,(\nu/\widehat{\nu})^{\alpha_{\rm tn}} & \text{for } \nu \gg \widehat{\nu} \end{cases} \tag{1}$$

ここでフィッテングのパラメータは、$\widehat{\nu}$ はターンオーバー周波数・$\widehat{F_\nu}$ はターンオーバー放射束密度・$\alpha_{\rm tk}$ は光学的に厚い側 (低周波数側) のべき指数・$\alpha_{\rm tn}$ は光学的に薄い側 (高周波数側) のべき指数での 4 変数である。実際のフィッテングは以下のようにおこなう。

IDL> **day='2000-4-8'**
IDL> **norp_rd_dat,day,mvd,tim,fi,fv,freq <CR>**
IDL> **norp_rd_avg,day,timavg,fiavg,fvavg <CR>**
IDL> **for m=0,6 do fi(m,*)=fi(m,*)-fiavg(m) <CR>**
IDL> **norp_alpha,freq,fi,mvd,mvdfit,alpha_tk,alpha_tn,freqpk,fluxpk <CR>**

フレア前静穏状態の放射束密度 (一日の平均値) を読み込んだデータから差し引いてフレア成分だけをとりだし、それを `norp_alpha` にわたす。`mvdfit` は得られたフィッティングが有効な場合 1 が無効な場合 (たとえば信号が弱いなどの理由で) についてはゼロがはいっている。

注意： 通常はこのような単純な手順ではフィッティングできない。実際は (1) 積分時間を長めにとって S/N を良くする、(2) 上記の関数から明らかにはずれた点をフィッティングからはずす (理由：低周波数は放射メカニズムが異なる、高周波数は S/N が良くない) などの手続が必要である。手順は節 3.8.3 を参照のこと。

3.7.1 光学的に薄い非熱ジャイロシンクロトロン放射 (試験公開)

注意：改良についてのコメント歓迎。

放射領域物理量から放射を求めることができる。
Dulk (1985) の方法と Ramaty (1969) の方法とが用意されている。ここでは電子の分布関数が以下のようなものであると仮定している。

$$\frac{dNV(E)}{dE} = K\left(\frac{E}{E_0}\right)^{-\delta}$$

E は電子のエネルギー (keV)・$NV(E)$ はエネルギー E 以上の電子数 (particles)。この分布はパラメータ δ と E_0 と K とによって記述されるが、K のかわりに $NV(E_0) = K/(\delta-1)/E_0^{\delta-1}$ を与える方が物理的な

意味が明確になるのでそちらを実際は用いる。以下のプロシジャでは Dulk (1985) にならい、$E_0 = 10$ keV で固定している。

(a) 物理量から放射を求める

放射領域の、電子分布べき指数 δ・磁場強度 (G)・視線と磁場とのなす角度 (度)、さらに (エネルギー 10keV 以上の) 非熱電子数 (個) を入力すると、放射束密度 (SFU)・円偏波率が以下のように得られる。Dulk (1985) の方法では

IDL> **dulk_gysy,delta,bb,theta,nv,freq,fi,rc <CR>**

さらに放射源の大きさ (立体角であたえる。単位は sterad) をあたえると光学的厚さが求まる。

IDL> **dulk_gysy,delta,bb,theta,nv,freq,fi,rc,omega,tau <CR>**

同様に Ramaty (1969) の方法では

IDL> **ramaty_gysy,delta,bb,theta,nv,freq,fi,rc <CR>**

IDL> **ramaty_gysy,delta,bb,theta,nv,freq,fi,rc,omega,tau <CR>**

(b) 放射から物理量を求める

Dulk (1985) の近似モデルにもとづいて、放射から放射領域物理量を求めることができる。α をもとめたあと (節 3.7 参照)、非熱電子の分布関数のべき指数がただちに求められる。

IDL> **norp_alpha,freq,fi,mvd,mvdfit,alpha_tk,alpha_tn,freqpk,fluxpk <CR>**

IDL> **norp_alpha2delta,alpha_tn,delta <CR>**

3.7.2 光学的に薄い熱制動放射 (試験公開)

注意：改良についてのコメント歓迎。

(a) 物理量から放射を求める

Dulk (1985) の近似モデルにもとづいて、放射領域物理量から放射を求めることができる。放射領域の電子温度 (K)・視線方向磁場強度 (G)・ボリュームエミッションメジャ (cm^{-3}) を入力すると、放射束密度 (SFU)・円偏波率が以下のように得られる。

IDL> **dulk_frfr,te,b_loc,vem,freq,fi,rc <CR>**

さらに放射源のサイズ (sterad) をあたえると光学的厚みも得られる。

IDL> **dulk_frfr,te,b_loc,vem,freq,fi,rc,omega,tau <CR>**

3.8 具体的なデータ解析の例

この節では解析の例を記す。

3.8.1 イベント選択

重要なイベントについては、偏波計のウェブサイトに紹介されている。まずはそこをみて概要をつかむのがのぞましい。URL は

`http://solar.nro.nao.ac.jp/norp/`

3.8.2 光度曲線

イベントを選びだしたら、光度曲線をみてみよう。重要なイベントについてはキャリブレーションの済んだデータが XDR (IDL save) フォーマットで保存してあるのでそれを読む。

IDL> **file=getenv('NORP_XDR')+'/1999/08/norp19990828_0056.xdr' <CR>**
IDL> **restore,file <CR>**

グラフ表示するには、

IDL> **mfreq=0 <CR>**
IDL> **norp_plot,mfreq,mvd,tim,fi <CR>**

ここで mfreq は、表示したいデータの周波数の freq の中での順番である。

別の周波数のデータを重ねるには

IDL> **mfreq1=1 <CR>**
IDL> **norp_plot,mfreq1,mvd,tim,fi,/over <CR>**

とする。

3.8.3 スペクトル解析

スペクトルを計算する際は積分時間を長くとった方がよい。300 点 (30 秒間) 分のデータを積分するには

IDL> **mint=300 <CR>**
IDL> **norp_mkint,mint,mvd,tim,fi,fv,mvdav,timav,fiav,fvav <CR>**

次にフレア前静穏電波放射束を差し引く。

IDL> **for m=0,6 do fiav(m,*)=fiav(m,*)-fiavg(m) <CR>**

えられた結果をスペクトルフィッティングする。

IDL> **norp_alpha,freq,fiav,mvdav,mvdfit,alpha_tk,alpha_tn,freqpk,fluxpk <CR>**

放射がジャイロシンクロトロン放射であると仮定すると非熱電子のべき δ がただちにもとまる。

IDL> **norp_alpha2delta,alpha_tn,delta <CR>**

また、フィッティング関数 (方程式 1) から明らかにはずれた観測点があるとフィッティングがうまくいかないことがある。理由は、低周波数では放射メカニズムが異なる (ジャイロシンクロトロンではなくプラズマ放射) のと、高周波数は S/N が良くない (特に 80GHz はよくない) ためである。そのようなときはその観測点をフィッティングから以下のようにしてはずす。

IDL> **mvfreq=[2,3,4,5,6] <CR>**
IDL> **norp_alpha,freq(mvfreq),fiav(mvfreq,*),mvdav(mvfreq,*) $ <CR>**
IDL> **,mvdfit,alpha_tk,alpha_tn,freqpk,fluxpk <CR>**

フィッティングした結果を確かめるために、フィッティング関数と観測点とを重ね合わせてみる。たとえば n ステップ目のデータを見るには

IDL> **norp_funcp,alpha_tk(n),alpha_tn(n),freqpk(n) ,fluxpk(n),freqfit,fifit <CR>**
IDL> **plot,freq,fiav(*,n),/xlog,/ylog,psym=5 <CR>**
IDL> **oplot,freqfit,fifit <CR>**

3.9 その他

3.9.1 生データを直接よみこむ

生データを直接よみこむ方法は、野辺山データは

IDL> **norp_rd_rdt,file,rdata,date,version <CR>**

豊川データは

IDL> **tykw_rd_rdt,file,rdata <CR>**

データに対応する時刻 (JST) を得るには

IDL> **timej=norp_rdt2timej(rdata)** <**CR**>

A　データアーカイブ匿名 FTP サイト

観測データベースファイルは日々蓄積されていくので適宜更新する必要がある。国立天文台野辺山太陽電波観測所では生データを含むデータベースを匿名 FTP サーバで公開している。NoRP データの URL は

```
ftp://nsro-archive.nro.nao.ac.jp/pub/norp
```

である。また大量のデータ転送はネットワーク負荷を軽減するためにできるだけ CD-ROM による郵送をお願いしたい。電子メールでアドレス

```
nsro-service@solar.nro.nao.ac.jp
```

に報せてもらえればただちに作成して送る。

謝辞

以下の方々に感謝します。

SolarSoftWare は、太陽観測データ解析用の IDL パッケージで、NASA のさまざまなプロジェクトのもとで支援を受けています。IDL は Research Systems Inc. が製造・販売しているデータ解析ソフトウェアです。

参考文献

Dulk, G. A., 1985, ARAA, **23**, 169

Nakajima et al. "The Radiometer and Polarimeters at 80, 35, and 17 GHz for Solar Observations at Nobeyama", PASJ, 37, 163 (1985)

Ramaty, 1969, ApJ, **158**, 753

Shibasaki et al. "Solar Radio Data Acquisition and Communication System (SORDACS) of Toyokawa Observatory", Proc. of the Res. Inst. of Atmospherics, Nagoya Univ., 26, 117 (1979)

Torii et al. "Full-Automatic Radiopolarimeters for Solar Patrol at Microwave Frequencies", Proc. of the Res. Inst. of Atmospherics, Nagoya Univ., 26, 129 (1979)