

ASTRA: UN SOFTWARE PER IL POST-PROCESSING DI DATI SPETTROMETRICI

Salvatore Pluchino
INAF-IRA, Istituto Nazionale di Astrofisica
Istituto di Radioastronomia, Bologna, Italy

IRA 422/08

Introduzione

La post-elaborazione di grandi quantità di dati, quali ad esempio lunghe sequenze di spettri, può richiedere l'utilizzo di software "ad hoc". Il software di post-processing spettrale sviluppato in seno al progetto ITASEL ha come nome ASTRA, un acronimo che sta per "Advanced Software Tools for Radio Astronomy". Esso gira in ambiente Windows ed è stato sviluppato in ambiente Visual Studio – VB 6.0 per sfruttare appieno le potenzialità grafiche di un'interfaccia user-friendly "multi finestra" unitamente ad una programmazione "object oriented". ASTRA integra al suo interno anche diverse librerie di data e signal processing del LabView Measurement Studio (della National Instruments) ed un motore di effemeridi basato sui kernel JPL della serie DE.

1.1 – Descrizione funzioni

Il post-processing di ASTRA è articolato in diverse parti (vedi fig. 1). Alcune di esse si occupano della calibrazione dei dati, altre sono di supporto a queste ultime fornendo i parametri necessari e calcolando ad esempio le orbite e le velocità radiali di ciascun oggetto. Altre ancora sono dedicate all'estrazione di segnali deboli dal rumore e costituiscono un versatile banco modulare di elaborazione di dati spettrali per la radioastronomia.

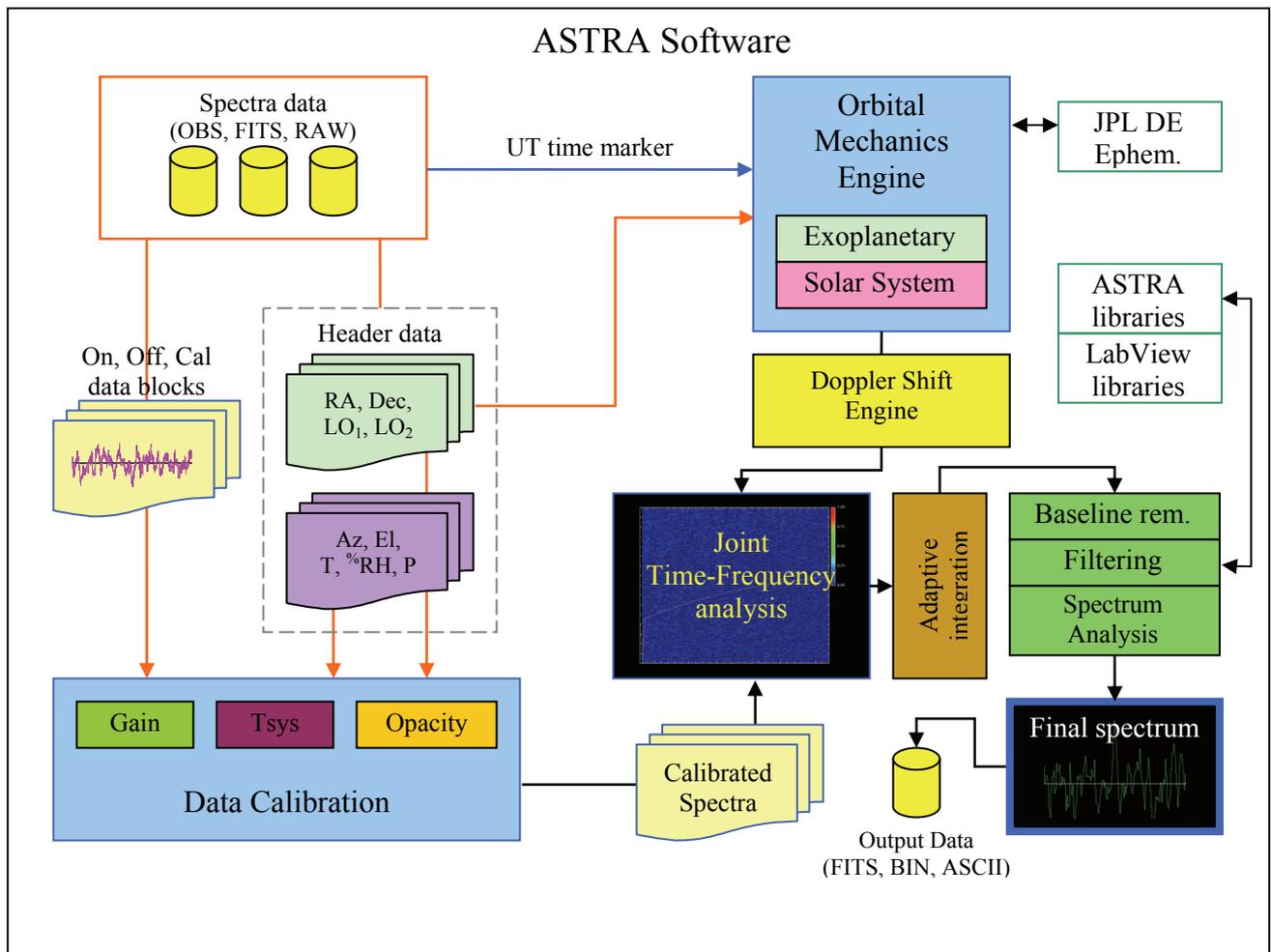


Fig.1.1 – Schema a blocchi del software ASTRA

1.2 – Formato dati

Il software ASTRA accetta in ingresso dati secondo il formato osservativo OBS sviluppato presso il Radiotelescopio INAF-IRA di Medicina e correntemente utilizzato per immagazzinare dati dagli spettrometri ad alta risoluzione. La struttura interna di un OBS è di tipo sequenziale e riporta numerose analogie con il ben più diffuso formato FITS, con cui ASTRA sarà presto compatibile. Infatti è allo sviluppo un sottoformato FITS compatibile con ASTRA e che verrà utilizzato per osservazioni in “multi-beam” di tipo MB-FITS. Il file OBS è di tipo binario e può includere diverse migliaia di spettri in sequenza. Esso infatti è utile per l’elaborazione multi-spettro nel tempo. Ogni singolo spettro è formato da un HEADER che conserva ogni informazione utile dei parametri osservativi, quali il nome e le coordinate dell’oggetto (sia equatoriali che azimutali) e da un blocco dati che contiene i valori di ciascun canale dello spettro. Sebbene sia allo studio una procedura di pre-processing che lavora a partire dal dominio del tempo, i dati su cui ASTRA abitualmente lavora sono spettri ottenuti mediante i moderni filtri polifasici di SPECTRA-1 o le trasformate di Fourier veloci nel dominio del tempo (FFT) nel caso di altri spettrometri. L’unità dati più piccola su cui ASTRA può lavorare è il singolo spettro, che verrà indicato d’ora in avanti come *BLOCCO*. Ogni blocco è il risultato di una integrazione (*average*) nel tempo di un certo numero di spettri.

Nome campo	Descrizione
Blknum	Numero progressivo dello spettro
Fs	Sampling Frequency. Frequenza di campionamento utilizzata a bordo dello spettrometro.
Winsize	Numero di campioni nel tempo utilizzati per ottenere uno spettro
ave_int	Numero di medie hardware effettuate dallo spettrometro prima di restituire un blocco dati
Fft_size	Numero di canali ottenuti dalla trasformazione nel dominio delle frequenze. Trattandosi di segnali reali, il numero di canali che include informazione utile è la metà del size riportato.
station_time	Indica il tempo di stazione in Universal Time
source_flag	Indica se il blocco dati è stato acquisito quando l’antenna era On-Source (1), Off-Source (2), Cal (3)
blocks2do	Numero di blocchi rimanenti alla fine dell’acquisizione
Astatus	Indica se l’antenna è in tracking o meno
SName	Nome della sorgente
sra	Ascensione Retta della sorgente puntata
sdec	Declinazione della sorgente puntata
Epoch	Epoca a cui sono riferite le coordinate equatoriali della sorgente
Svel	Velocità radiale della sorgente
Lo	Valore in MHz dell’Oscillatore Locale
Rfreq	Valore in MHz della frequenza a riposo (Rest Frequency)
raoff	Valore in minuti di arco orario dell’offset d’antenna in Ascensione Retta durante un Off-Source
decoff	Valore in primi d’arco dell’offset d’antenna in Declinazione durante un Off-Source
Bbc	Valore in MHz del secondo oscillatore locale (Video Converter)
Band	Valore in MHz della banda passante del Video Converter
recmode	Modalità del ricevitore correntemente in uso
pname	Nome del progetto
nCycle	Numero progressivo dei cicli completati
Aaz	Azimuth d’antenna
Ael	Elevazione d’antenna
ara	Ascensione retta d’antenna
adec	Declinazione d’antenna
Ncal	Kelvin della marca di calibrazione
Again	Guadagno d’antenna
Meteo_TAir	Temperatura al suolo in °C
Meteo_Press	Pressione atmosferica al suolo in mBar
Meteo_Humid	Umidità relativa al suolo

Tab.1.1 – Header del formato dati OBS utilizzato da ASTRA.

Il numero di integrazioni (di solito alcune migliaia) è riportato in uno dei campi dell'header (ave_int). Una prima integrazione (hardware) di solito avviene a bordo dello spettrometro, per questo ASTRA può lavorare a partire da un blocco di spettri già pre-integrati. Ogni set di misure spettrali, indicato d'ora in avanti come *CICLO*, può essere costituito da più blocchi. La differenziazione tra questi verrà chiarita al paragrafo 1.4.

1.3 – Preprocessing dei dati

Per procedere con l'apertura e l'elaborazione dei dati spettrali il software ASTRA può lavorare sia su un singolo file di spettri, che su un set di dati ottenuto a partire da più files. Il software dispone infatti di uno strumento di "data merging" che consente di aprire contemporaneamente anche diverse centinaia di file OBS su cui eseguire le seguenti operazioni:

- lettura del marker temporale relativo al primo spettro
- visualizzazione di alcune informazioni sugli spettri di ogni file, come:
 - i. dimensioni del file in bytes
 - ii. numero di spettri (blocchi dati) contenuti
 - iii. numero di bytes per blocco
 - iv. canali FFT o PFB dello spettro
- verifica della geometria dati interna dei cicli On, Off e Cal (vedere paragrafo 1.4 per ulteriori dettagli sulle differenze tra i tipi di dati acquisiti)
- verifica del numero totale di cicli completi con funzione di autocorrezione del blocco dati in caso di file corrotti o danneggiati
- calcolo del tempo totale di integrazione per ogni file OBS
- calcolo del tempo di integrazione in On source (tempo utile sulla sorgente)

Infine nella parte bassa della finestra è possibile visualizzare il numero totale di ore integrate, il numero di spettri e di files utilizzati, ed è possibile selezionare un periodo di inizio/fine tempo per filtrare solo alcuni files in funzione della data di acquisizione.

#file	Name file	Time UT	Dim.	Blks	By/Blk	FFT ch.	d.cyc	tot cyc	On int.	All int.	Ref. cyc
0001	EPSE_0012022.obs	20000101202511,00	5013600	300	16712	4096	4-4-2	30 (30)	00 59 60.00	02 29 60.00	1
0002	EPSE_0621354.obs	20000102034732,00	5013600	300	16712	4096	4-4-2	30 (30)	00 46 00.00	01 55 00.01	1
0003	EPSE_0031630.obs	20000103163211,00	5013600	300	16712	4096	4-4-2	30 (30)	01 01 60.00	02 34 60.00	1
0004	EPSE_0051718.obs	20000105172303,00	5013600	300	16712	4096	4-4-2	30 (30)	00 59 60.00	02 29 60.00	1
0005	EPSE_0061843.obs	20000106184706,00	5013600	300	16712	4096	4-4-2	30 (30)	02 01 60.00	05 04 60.00	1
0006	EPSE_0072154.obs	20000107215702,00	2623784	157	16712	4096	4-4-2	15,7 (15)	00 35 35.20	01 28 58.00	1
0007	EPSE_0631235.obs	20000304123637,00	5013600	300	16712	4096	4-4-2	30 (30)	00 44 00.00	01 50 00.00	1
0008	EPSE_0661251.obs	20000307125245,00	1453944	87	16712	4096	4-4-2	8,7 (8)	00 13 20.40	00 33 21.00	1
0009	EPSE_0022102.obs	20001231210508,00	3960744	237	16712	4096	4-4-2	23,7 (23)	00 55 18.00	02 18 14.99	1
0010	EPSE_0032036.obs	20010102193627,00	6016320	360	16712	4096	4-4-1	40 (40)	01 22 40.00	03 05 60.00	1
0011	EPSE_0051903.obs	20010104180724,00	6016320	360	16712	4096	4-4-1	40 (40)	01 22 40.00	03 05 60.00	1
0012	EPSE_0061833.obs	20010105173552,00	6016320	360	16712	4096	4-4-1	40 (40)	01 22 40.00	03 05 60.00	1
0013	EPSE_0071914.obs	20010106181616,00	6016320	360	16712	4096	4-4-1	40 (40)	01 19 60.00	02 59 60.00	1
0014	EPSE_0012057.obs	20020101205933,00	4696072	281	16712	4096	4-4-1	31,22...	01 04 31.56	02 25 11.01	1
0015	EPSE_0032049.obs	20020103205225,00	4696072	281	16712	4096	4-4-1	31,22...	01 04 31.55	02 25 11.00	1
0016	EPSE_0042044.obs	20020104204700,00	4595800	275	16712	4096	4-4-1	30,56...	01 03 08.89	02 22 05.00	1
0017	EPSE_0052029.obs	20020105203210,00	4813056	288	16712	4096	4-4-1	32 (32)	01 06 08.00	02 28 48.00	1
0018	EPSE_0062036.obs	20020106203909,00	4612512	276	16712	4096	4-4-1	30,67...	01 01 20.00	02 17 60.00	1
0019	EPSE_0071834.obs	20020107173101,00	6016320	360	16712	4096	4-4-1	40 (40)	01 22 40.00	03 05 60.00	1
0020	EPSE_0121741.obs	20020112174438,00	6016320	360	16712	4096	4-4-1	40 (40)	01 22 40.00	03 05 60.00	1
0021	EPSE_0132010.obs	20020113201339,00	4662648	279	16712	4096	4-4-1	31 (31)	01 04 04.00	02 24 09.00	1
0022	EPSE_0021633.obs	20021231163622,00	6016320	360	16712	4096	4-4-1	40 (40)	01 22 40.01	03 06 00.01	1

ADD MERGE IMPORT Tot. On time (h): 66,651 Tot. # cycles: 1990
 Used # scan: Selection from 2006 01 to 2007 01

Fig.1.2 – Finestra di data merging. Nelle colonne vengono stampati nell'ordine: un numero progressivo del file OBS incluso, il nome del file, il tempo UT del primo spettro, le dimensioni in bytes, il numero di blocchi, il numero di bytes per blocco, il numero di canali FFT o PFB, il data-cycle On-Off-Cal, il numero totale di cicli per ogni file, il tempo di integrazione On source, il tempo complessivo di integrazione ed il riferimento al primo ciclo integro del file.

1.4 – Calibrazione

Ogni file può contenere diversi spettri in sequenza. Ogni *spettro* è un *BLOCCO dati* che può formare secondo delle geometrie predefinite un CICLO completo, utile ad una prima operazione di calibrazione. Una “geometria dati” tipicamente utilizzata in radioastronomia ed in questo caso in spettroscopia è la On-Off-Cal, dove un uguale numero di spettri vengono acquisiti sia in modalità On-source che Off-source, ed accompagnati da una successiva acquisizione con la marca di calibrazione accesa (in posizione Off-source). Per preservare la linearità del processo è preferibile, se non addirittura necessario, utilizzare un uguale numero di blocchi On ed Off. La figura 1.2 rappresenta i 3 tipi di spettri utilizzati per la calibrazione. Mentre l’On e l’Off sono quasi identici escluso l’area di emissione della sorgente, il Cal presenta un delta positivo dovuto alla marca di calibrazione presente sull’intera banda passante dello spettrometro.

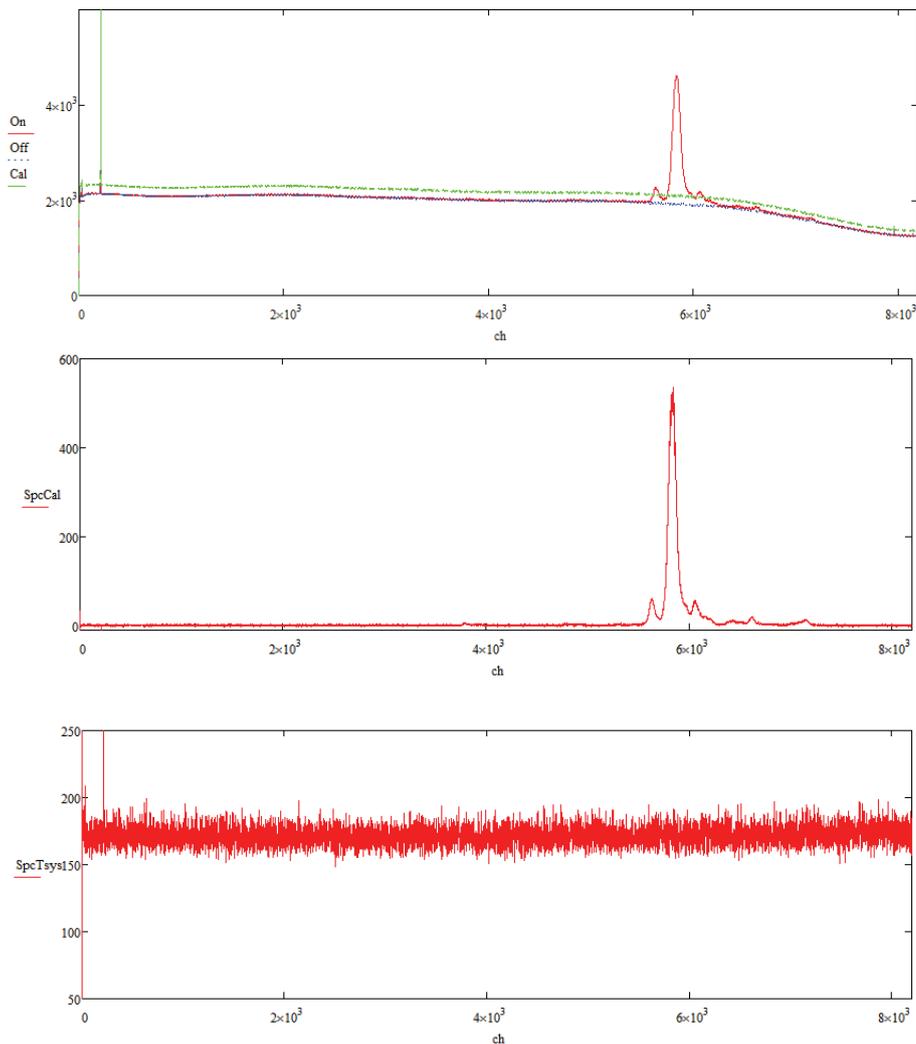


Fig.1.2 – Maser W3OH a 22 GHz. In alto: blocco spettri On, Off e Cal. Sulle ascisse i canali della FFT, sulle ordinate ci sono unità arbitrarie; Al centro: spettro On-Off calibrato in Kelvin; In basso: spettro delle Tsys (temperature di sistema) in Kelvin.

ASTRA per ogni ciclo completo di misure On, Off e Cal, ottiene automaticamente uno spettro calibrato in Kelvin mediante la:

$$Spc_{ch} = \frac{On_{ch} - Off_{ch}}{Cal_{ch} - Off_{ch}} \cdot NoiseCal \quad (1.1)$$

Analogamente, a partire dagli stessi dati ASTRA consente di calcolare automaticamente la densità spettrale della T_{sys} (temperatura di sistema) per ciascun canale frequenziale ch mediante la:

$$SpcT_{sys}_{ch} = \frac{Off_{ch}^2}{Cal_{ch}^2 - Off_{ch}^2} \cdot NoiseCal \quad (1.2)$$

dove la $NoiseCal$ è la temperatura equivalente di rumore della marca di calibrazione utilizzata dal setup osservativo di quel momento. La T_{sys} relativa a ciascuno spettro coincide dunque con il valor medio della densità spettrale pesato sul numero di canali frequenziali.

1.4.1 – Integrazione parametrizzata e pesata

Il tempo di integrazione complessivo di ogni spettro calibrato (On, Off e Cal) viene di volta in volta deciso in funzione del tipo di fenomeno da registrare ma è in genere dell'ordine di qualche minuto. La sensibilità dello strumento è definita dall'equazione del radiometro:

$$\Delta T \propto \frac{T_{sys}}{\sqrt{B \cdot \tau}} \quad (1.3)$$

Dove B è la risoluzione spettrale ottenibile dal PFB o dalla FFT, e la τ è il tempo di integrazione necessario per acquisire nel dominio del tempo uno spettro. Dalla 1.3 appare evidente che la sensibilità dello spettrometro, ovvero il rapporto S/N, migliora al crescere del tempo di integrazione e della banda. Chiaramente il miglioramento ha un limite, dato dal rumore $1/f$, che non può essere superato e che limita l'integrazione utile ad un numero più o meno elevato di ore. Per ottenere una misura spettrale finale si integra a partire da un certo numero di spettri che sono acquisiti il più delle volte in sessioni osservative diverse per condizioni meteo e per le caratteristiche di sistema (T_{sys} , guadagno d'antenna, ecc.).

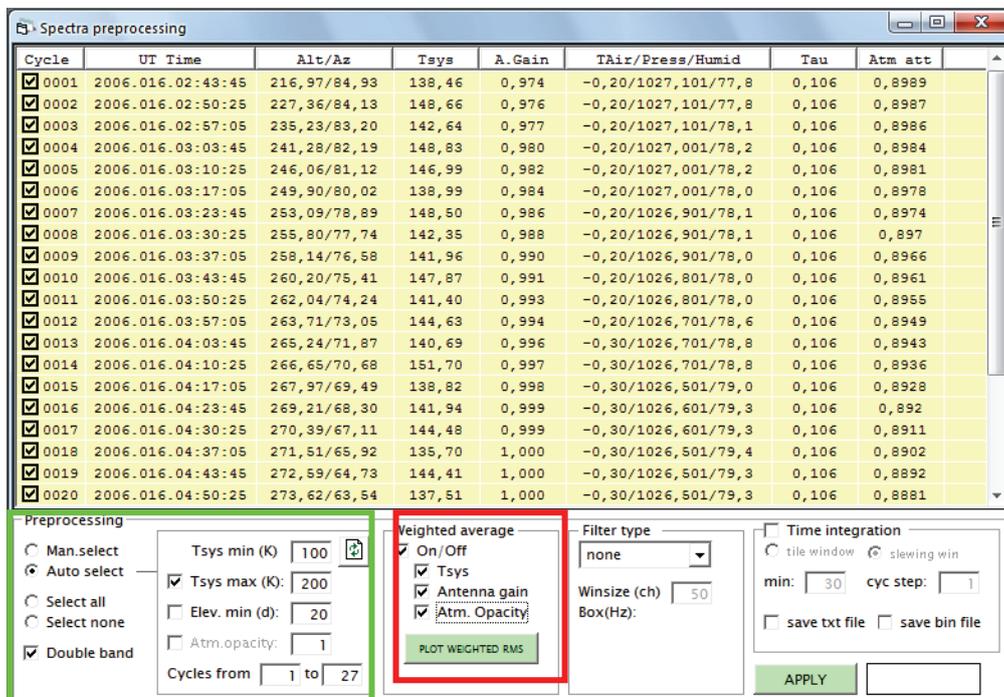


Fig.1.3 – Una delle finestre di controllo di ASTRA dalla quale è possibile impostare il tipo di scrematura preliminare degli spettri (riquadro in verde) e la pesatura dell'integrazione (riquadro in rosso).

Spettri che differiscono per questi parametri non possono essere integrati senza una adeguata scrematura preliminare ed una corretta pesatura. Si rende necessario dunque pesare ciascuno spettro attribuendogli un coefficiente che è funzione dei rispettivi parametri osservativi. Il software ASTRA può eseguire una prima scrematura automatica (vedi riquadro verde in fig. 1.3) degli spettri in base ai seguenti parametri:

- *range di Tsys ammissibili*: è possibile selezionare un valore massimo di Tsys al di sopra del quale gli spettri verranno automaticamente esclusi dall'integrazione. Vengono anche esclusi automaticamente gli spettri aventi i cicli di calibrazione corrotti.
- *elevazione d'antenna*: è possibile selezionare un valore minimo per l'elevazione (in gradi) al di sotto del quale gli spettri verranno esclusi dall'integrazione.
- *range del numero di spettri*: è possibile selezionare un sottoinsieme ben definito da tutto il file indicando lo spettro iniziale e quello finale.

Dopo questa prima selezione parametrica degli spettri da utilizzare, ASTRA può eseguire un'integrazione pesata (vedi riquadro rosso in fig. 1.3) utilizzando un set c_N di coefficienti:

$$WS_{ch,N} = \frac{\sum_N \left[c_N \sum_{ch} S_{ch,N} \right]}{\sum_N c_N} \quad (1.4)$$

Dove WS è l'integrazione pesata dello spettro (Weighted Spectrum), N è il numero di spettri integrati S , ch è il canale del PFB (Polyphase Filter Bank) o della FFT. Ciascun coefficiente c_N è ottenuto dalla somma di altri coefficienti normalizzati ad 1 che sono funzione di:

- *Tsys*: la temperatura di sistema viene normalizzata all'interno di un range di valori da 100 a 300 K, assumendo un coefficiente pari ad 1 per uno spettro avente $T_{sys} = 100$ K e 0 per uno spettro avente $T_{sys} = 300$ K. Le soglie di minimo e di massimo possono essere ulteriormente parametrizzate.
- *Guadagno d'antenna* per deformazioni geometriche del riflettore varia al variare dell'elevazione e può essere approssimato mediante l'uso di una polinomiale di secondo grado i cui coefficienti a 22 GHz (banda K) sono (vedi Ref. 1.1):
 $a = -2.4658337 \cdot 10^{-4}$; $b = 2.0935913 \cdot 10^{-2}$; $c = 4.4252013 \cdot 10^{-1}$
- *L'attenuazione atmosferica* a cui è soggetta una radiazione elettromagnetica proveniente dallo spazio. Ciascuna delle molecole di gas di cui è composta l'atmosfera interagisce con le radioonde, tale interazione può provocare in alcuni casi la perdita dell'energia trasportata dall'onda dando origine ad un processo di attenuazione. L'attenuazione è tanto più forte quanto ci si avvicina alle frequenze di risonanza delle diverse molecole. Ad esempio il vapor d'acqua ha diverse frequenze di risonanza (22 GHz, 183 GHz e 324 GHz).

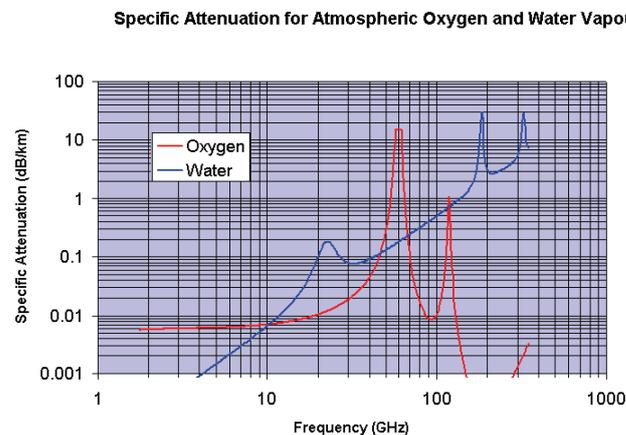


Fig.1.4 – Attenuazione specifica (dB/km) dovuta al vapor d'acqua (blu) ed all'ossigeno(rosso) atmosferico.

L'attenuazione in banda K (dove si trova la frequenza di risonanza del vapor d'acqua a 22,235 GHz) ha una forte dipendenza dal PWV (Precipitable Water Vapour) ovvero dal contenuto colonnare di vapor acqueo che c'è lungo la linea di osservazione. La cifra di PWV è fortemente correlato (al 90% circa, vedi Rif. 1.2) con il coefficiente di attenuazione allo zenith τ_0 misurato al radiotelescopio e questo fornisce dunque una buona stima sulla bontà del "seeing". Per ottenere i valori del PWV relativi anche a precedenti osservazioni è possibile utilizzare un database online che raccoglie i dati di migliaia di stazioni dislocate in tutto il mondo (<http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>). Nello specifico per il radiotelescopio di Medicina viene utilizzata la postazione numero 16144 situata a San Pietro Capofiume, una località distante circa 15 km in linea d'aria. I dati del PWV relativi a questa località hanno presentato una elevata affinità con quelli calcolati per Medicina a partire dai parametri meteo (temperatura, umidità relativa e pressione atmosferica). ASTRA può accedere automaticamente al database online chiedendo le informazioni meteo per la data voluta. In maniera sequenziale, anche andando di molti anni a ritroso, può ripetere la stessa operazione per migliaia di spettri estraendo all'occorrenza i parametri per ognuno di essi. I valori della τ_0 messi in correlazione con quelli del PWV provenienti sia dai calcoli a partire dai parametri meteo che dalle misure delle sonde atmosferiche dalla stazione di Capofiume hanno restituito la seguente equazione utilizzata da ASTRA:

$$\tau_0 = 0,0069 \cdot PWV_{CAPOFIUME} + 0,0319 \quad (1.5)$$

Con un coefficiente di correlazione lineare di 0.895 ed un rms del residuo rispetto alla retta interpolante di circa il 20% (vedi Rif. 1.2).

Per una buona calibrazione in banda K bisogna tener conto degli effetti attenuativi dovuti all'opacità. La temperatura d'antenna varia in funzione degli angoli zenitali e dell'attenuazione allo zenith (detta anche "spessore ottico allo zenith", vedi Rif. 1.3) secondo la legge:

$$T(\mathcal{G}, \tau_0) = T_0 + T_a(1 - e^{-\tau_0 \sec(\mathcal{G})}) \quad (1.6)$$

dove la T_0 è la somma della temperatura di rumore del ricevitore e di altri contributi, T_a è la temperatura di riferimento e τ_0 è l'attenuazione atmosferica allo zenith; e dove:

$$\sec(\mathcal{G}) = \frac{1}{\sin(\mathcal{G})} = \frac{1}{\cos(90^\circ - \mathcal{G})} \quad (1.7)$$

viene detta massa d'aria (*Air Mass*).

Dalla stessa finestra infine è possibile parametrizzare l'integrazione dividendola in più segmenti in funzione del tempo e della durata. E' possibile ad esempio impostare la lunghezza in tempo T_{int} di ciascun segmento e successivamente:

- integrare su finestre temporali contigue. ASTRA restituirà un numero di spettri pari a:

$$N_{Spc} = \frac{T_{tot}}{T_{int}} \quad (1.8)$$

dove T_{tot} è il tempo d'integrazione complessivo. ASTRA può salvare automaticamente nell'unità disco il risultato di ciascuna integrazione per consentirne un post processing successivo.

- a partire dagli N_{tot} spettri, integrare in finestre temporali sovrapposte un numero di spettri N_{win} con un fattore di sovrapposizione *Overlap*. In tal caso il numero di spettri finale è:

$$N_{spc} = \frac{N_{tot} - N_{win}}{N_{win} - \text{Overlap}} + 1 \quad (1.9)$$

1.5 – Correzione per il Doppler

La radiazione elettromagnetica emessa da una qualsiasi sorgente in moto rispetto all'osservatore subisce una variazione di fase e dunque un drift in frequenza dovuti all'effetto Doppler. In particolare, definendo con v_{rad} la velocità radiale, ovvero la componente della velocità della sorgente rispetto all'osservatore lungo la linea di vista, è possibile calcolare l'effetto doppler non relativistico mediante la:

$$\frac{\Delta f}{f} = -\frac{v_{rad}}{c} \quad (1.10)$$

dove la variazione di frequenza Δf è legata alla variazione di fase $\Delta\phi$ dell'onda elettromagnetica mediante la:

$$\Delta f = \frac{1}{2\pi} \frac{d(\Delta\phi)}{dt} \quad (1.11)$$

Supponendo di campionare con una data frequenza di campionamento F_{samp} il segnale proveniente da una radiosorgente, se utilizziamo segnali reali, per produrre un singolo spettro mediante una *FFT* o una *PFB* con n canali, è necessario utilizzare $2n$ punti reali. Per farlo sarà necessario un tempo di integrazione (o di acquisizione, al netto dei tempi di bufferizzazione e di calcolo) T_{int} pari a:

$$T_{int} = \frac{2n}{F_{samp}} \quad (1.12)$$

dunque per poter parlare di variazione di fase e di frequenza nell'unità di tempo, e quindi di compensazione per il doppler, è necessario supporre che il *segnale sia stazionario* nel tempo T_{int} .

Da queste premesse appare evidente che l'analisi frequenziale ad alta risoluzione presuppone una la validità dell'ipotesi di stazionarietà del segnale per tempi che possono essere più o meno lunghi. Il problema si fa più sentire tanto più alta è la velocità radiale del target, o viceversa tanto più elevata viene richiesta la risoluzione frequenziale, condizioni che spesso si verificano nelle osservazioni di tipo planetario o di radioscienza all'interno del sistema solare.

1.5.1 – Moti orbitali da compensare

La componente della velocità lungo la linea di osservazione è appunto la velocità radiale. Questa è la risultante di diverse componenti che vanno a sommarsi vettorialmente:

- velocità orbitale di rotazione per un punto sulla superficie terrestre, data dalla:

$$v_{rot} = v_{eq} \cdot \cos(lat) \cdot \cos(\delta) \cdot \sin(\Delta T_{tran}) \quad (1.13)$$

dove $v_{eq} = 0.465 \text{ km/s}$ è la velocità radiale di un'ipotetica sorgente posta sull'equatore celeste (ad una declinazione $\delta = 0^\circ$) che si trova al meridiano locale (ad un delta di transito $\Delta T_{tran} = 0$) per un punto situato sull'equatore terrestre ($lat = 0^\circ$). Si noti come la curva della velocità radiale per la rotazione terrestre viene *fasata* affinché abbia valore massimo all'istante del tempo di transito della sorgente al meridiano locale.

- velocità orbitale di rivoluzione della Terra attorno al sole, che approssimando ad un'orbita circolare è data dalla:

$$v_{riv} = v_{Earth} \cdot \cos(\beta) \cdot \sin(\Delta T_{equinox}) \quad (1.14)$$

dove $v_{Earth} = 29.8 \text{ km/s}$ è la velocità della Terra lungo l'orbita di rivoluzione attorno al Sole, β è la latitudine eclittica (o celeste) positiva o negativa rispettivamente se la sorgente è a nord o a sud dell'eclittica, ed è data dalla:

$$\beta = \arcsin[\sin(\delta) \cdot \cos(\varepsilon)] - [\cos(\delta) \cdot \sin(\varepsilon) \cdot \sin(\alpha)] \quad (1.15)$$

dove $\varepsilon = 23.4392911^\circ$ è l'obliquità dell'eclittica al 2000.0, e dove (α, δ) sono le coordinate rettangolari geocentriche della sorgente sempre alla stessa epoca. Infine $\Delta T_{equinox}$ è il tempo che intercorre tra l'istante considerato e l'equinozio di primavera. Si noti come anche in questo caso la curva delle velocità radiali è fasata in modo da avere valor massimo in concomitanza dell'equinozio di primavera.

- proiezione lungo la linea di vista del vettore velocità del Sole rispetto al Local Standard of Rest (LSR). Vengono definiti due tipi di LSR:
 1. Il “*dynamical LSR*” è il punto nelle vicinanze del Sole che si trova in un'orbita circolare attorno al centro della Galassia. Il moto del Sole rispetto al LSR dinamico è chiamato “moto solare peculiare”.
 2. Il “*kinematical LSR*” è utilizzato per convenzione dagli astronomi osservativi ed è la media dello standard of rest di un catalogo specifico di stelle. Il moto del sole rispetto ad un LSR cinematico viene chiamato “moto solare standard” la cui velocità è la media delle velocità delle stelle di tipo spettrale dalla A alla G. Questo moto è di 20 km/s verso un punto che ha coordinate rettangolari $\alpha = 18 \text{ h}$, $\delta = 30^\circ$ all'epoca 1900.0 (coordinate galattiche $\lambda = 56^\circ$, $\beta = 23^\circ$)
- velocità orbitale di rivoluzione di un pianeta extrasolare attorno ad una stella, che approssimando ad un'orbita circolare può essere calcolata mediante l'equazione:

$$v_p = \frac{2\pi}{T_p} \cdot R_p \cdot \cos\left[\frac{2\pi}{T_p} \cdot (t - t_0)\right] \cdot \sin(i) \quad (1.16)$$

dove T_p è il periodo orbitale del pianeta, R_p è il raggio dell'orbita, t_0 è il tempo di passaggio al periastro ed i è l'inclinazione dell'orbita.

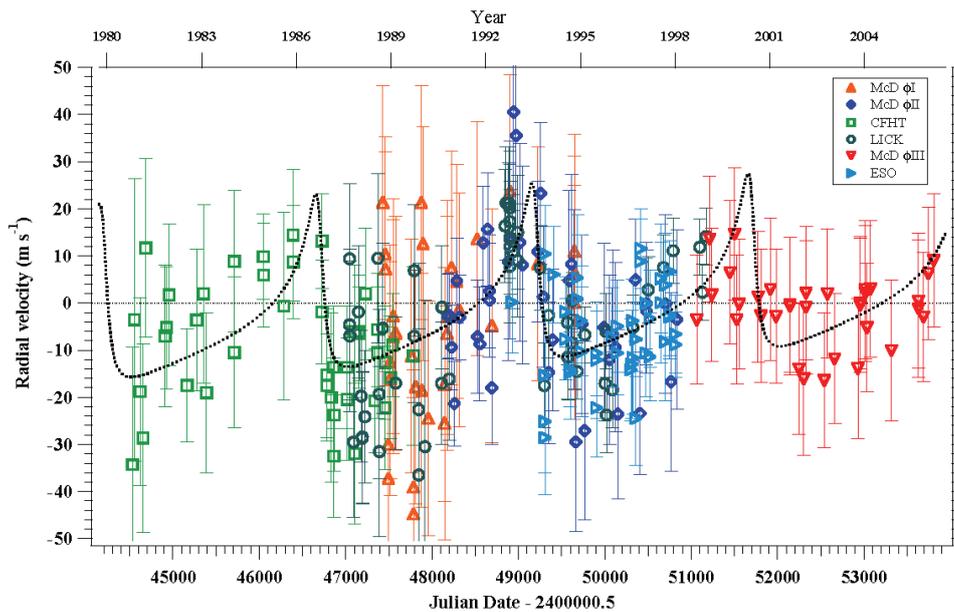


Fig. 1.5 – Grafico delle velocità radiali di Epsilon Eridani (Rif. 1.4), con un periodo di 2502 giorni. E' visibile un range di velocità radiali di circa +/-20 m/s che a 22 GHz equivale ad un range doppler di circa 3 kHz.

1.5.2 – Sistema di effemeridi JPL DE-series

Il JPL (Jet Propulsion Laboratory) ha creato una serie di effemeridi ad alta risoluzione per i pianeti e le ha rese disponibili per il download sia in formato ASCII che in formato binario attraverso il loro sito ftp (<ftp://navigator.jpl.nasa.gov>). Tramite i polinomi di Chebyshev, utilizzando i coefficienti contenuti nel file delle DE-series del JPL è possibile ottenere le 3 componenti della posizione e della velocità per ciascun corpo ad un dato istante di tempo, nel caso della Luna anche tenendo conto degli angoli di librazione e di nutazione. ASTRA utilizzando le “DE405 Solar System Ephemerides” può arrivare ad una accuratezza posizionale elevatissima. Per i pianeti interni ad esempio l’accuratezza è dell’ordine di 0.001 as (che equivale a circa 1 km alla distanza di Marte). Per i pianeti esterni, come ad esempio Saturno, le effemeridi raggiungono i 0.1 as.

0 - 'MERCURY'	8 - 'PLUTO'	
1 - 'VENUS'	9 - 'MOON'	(earth's moon)
2 - 'EARTH'	10 - 'SUN'	
3 - 'MARS'	11 - 'SOLARBARY'	(solar system barycenter)
4 - 'JUPITER'	12 - 'EARTH'BARY'	(earth-moon barycenter)
5 - 'SATURN'	13 - 'NUTATIONS'	
6 - 'URANUS'	14 - 'LIBRATIONS'	
7 - 'NEPTUNE'	15 - 'NO PLANET'	

Tab. 1.2 – Convenzione utilizzata per gli oggetti nelle DE405 utilizzati come ORIGIN oppure TARGET

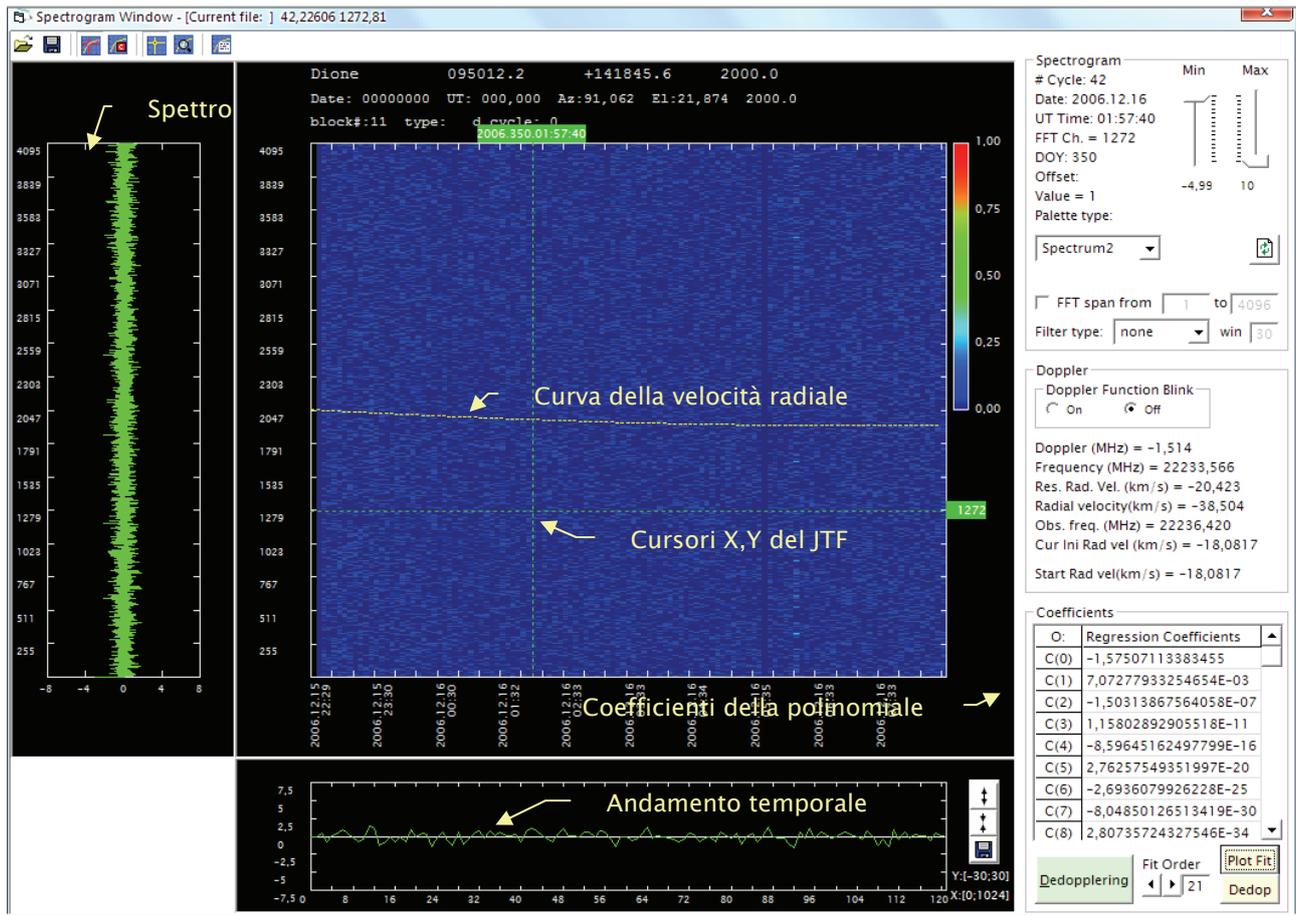


Fig. 1.6 – Pannello Spectrogram di ASTRA. Nella parte centrale il grafico JTF (Joint Time Frequency) in falsi colori, dove sulle ascisse c’è il tempo e sulle ordinate la frequenza. Nei due riquadri (sotto e a sinistra) è possibile visualizzare i singoli spettri e l’andamento temporale del singolo canale. Sulla destra ASTRA visualizza diverse informazioni sia di tempo che di frequenza, oltre a dare indicazioni sulle velocità radiali e sui residui. In basso a destra infine vengono mostrati i coefficienti della polinomiale di n-ordine che fitta i dati delle velocità fornite dal sito web di HORIZON del JPL. La curva polinomiale viene poi plottata in giallo nello spettrogramma JTF.

In particolare ASTRA utilizza le DE405 per il calcolo della velocità del baricentro del sistema Terra-Luna rispetto al baricentro del Sistema Solare. E' possibile infatti utilizzare le DE405 in diversi modi scegliendo opportunamente l'oggetto ORIGIN e quello TARGET come è visibile dalla tabella 1.2

```

Revised: Sep 28, 2006                Dione / (Saturn)                604
http://ssd.jpl.nasa.gov/?sat_phys_par
http://ssd.jpl.nasa.gov/?sat_elem

SATELLITE PHYSICAL PROPERTIES:
Mean Radius (km)      = 562.5 +- 5      Density (g/cm^3) = 1.469 +- 0.012
Mass (10^22 g)        = 109.572      Geometric Albedo = 0.6
GM (km^3/s^2)         = 73.113 +- 0.02 V(1,0) = +0.8

SATELLITE ORBITAL DATA (mean values referred to local Laplace plane):
Semi-major axis, a (km) = 377.42(10^3)      Orbital period = 2.736915 d
Eccentricity, e         = 0.0022          Rotational period = Synchronous
Inclination, i (deg)   = 0.028

*****
Ephemeris / WWW_USER Sat Apr 21 03:12:21 2007 Pasadena, USA / Horizons
*****
Target body name: Dione (604)                {source: SAT252}
Center body name: Earth (399)                {source: DE405}
Center-site name: (user defined site below)
*****
Start time      : A.D. 2006-Dec-15 00:00:00.0000 UT
Stop time       : A.D. 2006-Dec-17 00:00:00.0000 UT
Step-size       : 5 minutes
*****
Target pole/equ : IAU DIONE                  {East-longitude -}
Target radii    : 560.0 x 560.0 x 560.0 km   {Equator, meridian, pole}
Center geodetic : 11.6469167,44.5205478, .02460819 {E-lon(deg), Lat(deg), Alt(km)}
Center cylindric: 11.6469167,4555.12910,4449.5302 {E-lon(deg), Dxy(km), Dz(km)}
Center pole/equ : High-precision EOP model   {East-longitude +}
Center radii    : 6378.1 x 6378.1 x 6351.8 km {Equator, meridian, pole}
Target primary  : Saturn                     {source: DE405}
Interfering body: MOON (Req= 1737.400) km    {source: DE405}
Deflecting body : Sun, EARTH                 {source: DE405}
Deflecting GMs  : 1.3271E+11, 3.9860E+05 km^3/s^2
Atmos refraction: NO (AIRLESS)
RA format       : HMS
Time format     : CAL
RTS-only print  : NO
EOP file        : eop.070419.p070711
EOP coverage    : DATA-BASED 1962-JAN-20 TO 2007-APR-19. PREDICTS-> 2007-JUL-10
Units conversion: 1 AU= 149597870.691 km, c= 299792.458 km/s, 1 day= 86400.0 s
Table cut-offs 1: Elevation ( 15.0deg=YES),Airmass (>38.000=NO), Daylight (NO )
Table cut-offs 2: Solar Elongation ( 0.0,180.0=NO )
*****
Date__ (UT) __HR:MN   R.A._ (ICRF/J2000.0) _DEC dRA*cosD d(DEC)/dt Azi_(a-appr) _Elev      delta      deldot
*****
$$$OE
2006-Dec-15 00:00    09 50 22.80 +14 18 21.1    -3.90      2.38 107.1631 31.3844 8.67213963918735 -35.0731846
2006-Dec-15 00:05    09 50 22.78 +14 18 21.3    -3.95      2.37 108.2454 37.2358 8.67206932900014 -35.0472550
2006-Dec-15 00:10    09 50 22.76 +14 18 21.5    -3.99      2.36 109.3466 38.0819 8.67199907155039 -35.0206028
2006-Dec-15 00:15    09 50 22.73 +14 18 21.7    -4.04      2.36 110.4675 38.9223 8.67192886828387 -34.9932314
2006-Dec-15 00:20    09 50 22.71 +14 18 21.9    -4.09      2.35 111.6094 39.7565 8.67185872063912 -34.9651447
2006-Dec-15 00:25    09 50 22.69 +14 18 22.1    -4.14      2.34 112.7733 40.5841 8.67178863004730 -34.9363462
2006-Dec-15 00:30    09 50 22.66 +14 18 22.2    -4.18      2.33 113.9603 41.4046 8.67171859793195 -34.9068398
2006-Dec-15 00:35    09 50 22.64 +14 18 22.4    -4.23      2.32 115.1715 42.2175 8.67164862570887 -34.8766295
2006-Dec-15 00:40    09 50 22.61 +14 18 22.6    -4.28      2.32 111.4082 43.0223 8.67157871478586 -34.8457193
2006-Dec-15 00:45    09 50 22.59 +14 18 22.8    -4.32      2.31 117.6716 43.8184 8.67150886656263 -34.8141132
2006-Dec-15 00:50    09 50 22.56 +14 18 23.0    -4.37      2.30 118.9630 44.6053 8.67143908243052 -34.7818154
2006-Dec-15 00:55    09 50 22.54 +14 18 23.2    -4.42      2.29 120.2836 45.3822 8.67136936377241 -34.7488303
2006-Dec-15 01:00    09 50 22.51 +14 18 23.4    -4.46      2.28 121.6347 46.1487 8.67129971196252 -34.7151621
2006-Dec-15 01:05    09 50 22.49 +14 18 23.6    -4.51      2.27 123.0177 46.9040 8.67123012836623 -34.6808154
2006-Dec-15 01:10    09 50 22.46 +14 18 23.8    -4.55      2.26 124.4339 47.6474 8.67116061433993 -34.6457947
2006-Dec-15 01:15    09 50 22.44 +14 18 24.0    -4.60      2.26 125.8847 48.3782 8.67109117123084 -34.6101045
2006-Dec-15 01:20    09 50 22.41 +14 18 24.2    -4.64      2.25 127.3714 49.0955 8.67102180037685 -34.5737495
2006-Dec-15 01:25    09 50 22.38 +14 18 24.3    -4.69      2.24 128.8953 49.7985 8.67095250310638 -34.5367346
2006-Dec-15 01:30    m 09 50 22.36 +14 18 24.5    -4.73      2.23 130.4577 50.4865 8.67088328073823 -34.4990645
2006-Dec-15 01:35    m 09 50 22.33 +14 18 24.7    -4.78      2.22 132.0599 51.1584 8.67081413458138 -34.4607442

```

Tab. 1.3 – Esempio di file effemeridi nel formato HORIZON, compatibile con ASTRA. Nel caso specifico si tratta delle effemeridi di Dione, uno dei satelliti di Saturno, calcolate per Medicina. ASTRA legge in maniera sequenziale questi file utilizzando diversi campi come il tempo UT, il raggio vettore delta dell'oggetto (in UA) e il modulo della velocità radiale rispetto all'osservatore. Viene quindi calcolato un set di coefficienti per una funzione polinomiale di ordine elevato che in un secondo momento può restituire per ogni istante di tempo richiesto (per ogni singolo spettro) i valori della velocità radiale e dunque del doppler.

1.5.3 –Dedoppler dei dati

ASTRA incorpora diversi strumenti per compensare automaticamente il doppler degli spettri. Specie per quelle sorgenti il cui rapporto S/N è piuttosto basso, applicare una corretta curva di dedoppler sui dati può fare la differenza nel risultato finale.

HORIZONS Data: Dal pannello “Spectrogram” (vedi fig. 1.7) è possibile visualizzare il grafico tempo-frequenza o JTF (Joint Time Frequency) degli spettri che vengono man mano processati. Sempre da questo pannello è possibile effettuare diverse misure di tempo/frequenza sui dati, visualizzare il doppler relativo ad un dato canale spettrale, la velocità radiale e diverse altre informazioni. Cliccando sull'apposita icona è possibile caricare in memoria un file di effemeridi nel formato HORIZON (<http://ssd.jpl.nasa.gov/?horizons>), il sistema di effemeridi online per i corpi del Sistema Solare, messo a disposizione dal JPL. Una volta caricato il file effemeridi il software calcola i coefficienti di una polinomiale di ordine n (impostabile) che verrà poi utilizzata per ricostruire, estrapolandone i valori in funzione del tempo, la curva delle velocità radiali.

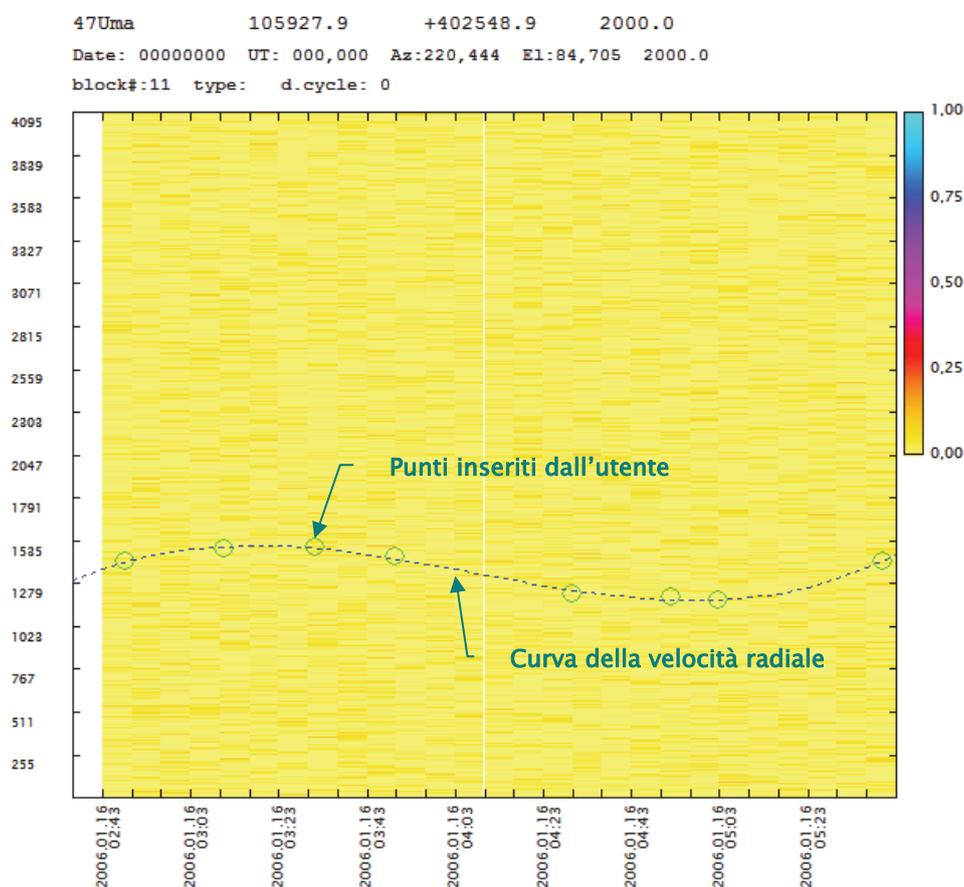


Fig. 1.7 – Uno spettrogramma d’esempio del piano JTF. Sulle ascisse i tempi coprono un intervallo di circa 3 ore di integrazione. Sulle ordinate sono rappresentati i 4096 canali della FFT. Scala in falsi colori, unità di misura Jy. La linea sinusoidale che attraversa lo spettrogramma è un esempio di curva delle velocità radiali così come può essere generata con pochi click del mouse sul piano della JTF.

Curva doppler customizzata: è possibile attivare la funzione manuale sul piano del JTF che consente, mediante alcuni click del mouse, in maniera interattiva di aggiungere alcuni *marker tempo-frequenza* in corrispondenza di eventuali features visibili nel grafico. In questo caso il dedoppler-engine di ASTRA, a partire dai punti inseriti dall’utente, costruisce una funzione polinomiale che fittandoli restituisce per ciascuno spettro il corretto shift inverso da applicare.

```

> Fit Degree=4
> # points=
> C(0)=+1300,157957101
> C(1)=+74,410547792083
> C(2)=-7,81536809258177
> C(3)=+0,187898327554078
> C(4)=+1,17174263404512E-04
>
> Add pnt[08]
> Used points:
> Pnt UT Date UT Time Cyc FFT Offset Dopp. Sky Res.rad. Targ.Centr.
> ## YYYY.MM.DD.hh:mm:ss ### Ch (MHz) Freq. (MHz) vel (km/s) vel (km/s)
> 01 2001.01.11.02:50:25 001 01412 -1,242 22233,838 -16,7598 +00,0000
> 02 2001.01.11.03:10:25 005 01486 -1,098 22233,982 -14,8098 +00,0000
> 03 2001.01.11.03:50:25 010 01440 -1,188 22233,892 -16,0220 +00,0000
> 04 2001.01.11.04:30:25 016 01217 -1,623 22233,457 -21,8985 +00,0000
> 05 2001.01.11.04:50:25 020 01198 -1,660 22233,420 -22,3991 +00,0000
> 06 2001.01.11.05:37:05 027 01412 -1,242 22233,838 -16,7598 +00,0000
> 07 2001.01.11.03:30:25 008 01495 -1,080 22234,000 -14,5726 +00,0000
> 08 2001.01.11.05:03:45 021 01179 -1,697 22233,383 -22,8998 +00,0000

```

Tab.1.4 – Un estratto del logfile prodotto da ASTRA durante l'esempio di dedopplerung manuale di Fig. 1.8. Nella parte alta i coefficienti della polinomiale di 4° ordine; nella parte bassa l'elenco dei singoli punti nell'ordine di inserimento, accompagnati dalle informazioni tempo-frequenza.

Definita la funzione si può procedere con l'editing manuale dei coefficienti, visualizzando in tempo reale gli effetti sulla curva delle velocità, oppure lanciare la procedura di dedopplerung cliccando sull'apposito bottone.

Compensazione generica del doppler: In tutti quei casi dove non si dispone delle effemeridi in formato HORIZONS (che ricordiamo esistono solo per i corpi del Sistema Solare) si possono utilizzare le funzioni di compensazione del doppler descritte nel dettaglio al paragrafo 1.5.1 ed attivabili (anche per singole componenti) dal pannello di setup visibile in fig. 1.8.

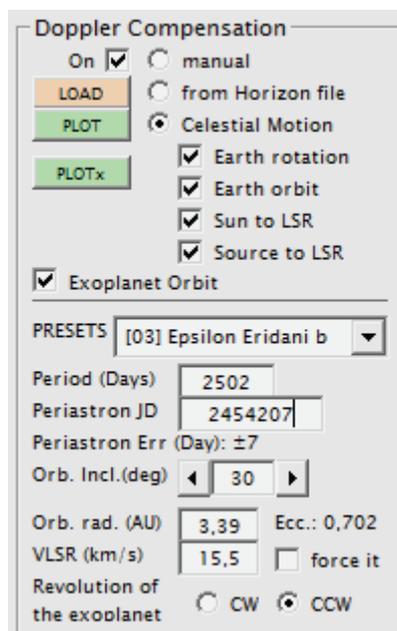


Fig. 1.8 – Il pannello di setup di ASTRA per la compensazione del doppler. E' possibile selezionare separatamente i contributi doppler da compensare (rotazione e rivoluzione terrestre, moto del Sole rispetto al LSR, moto di un pianeta attorno ad una stella). Nella parte bassa del pannello è altresì possibile impostare manualmente i parametri orbitali oppure scegliere i target da una lista già precaricata in memoria.

1.6 – Data Logging

Il software dispone di alcune utili funzioni di data logging. Per ogni sessione viene creato un logfile che contiene ogni operazione eseguita da ASTRA. In questa maniera ogni data processing sarà facilmente riconducibile ai passaggi che hanno prodotto il risultato finale.

Per ogni spettro processato viene stampata una riga che riporta:

- il *numero progressivo* dello spettro all'interno del set di dati da processare
- il *tempo medio del blocco On* source in UTC. Il tempo medio può differire anche decine di secondi dal tempo del primo spettro, per cui ogni blocco On completo viene marcato con il tempo medio dei vari blocchi integrati.
- l'*RMS*, che nel caso di spettri calibrati viene espresso in Kelvin, altrimenti in unità arbitrarie
- il *coefficiente di normalizzazione On/Off*. Frequentemente la banda dello spettrometro necessita di una equalizzazione tra l'On e l'Off source. La funzione di normalizzazione è utilizzabile nei casi di sorgenti a spettro discreto (da disattivare sempre nel caso di calibratori o sorgenti a spettro continuo) e consente di calcolare il parametro di equalizzazione tra lo spettro On e quello Off. E' indispensabile scegliere per questo compito una regione della banda dove non si trovano features spettrali della sorgente, per farlo basta settare opportunamente i due campi di start e stop dal pannello di controllo. Tale coefficiente, se lo spettro è stato acquisito in buone condizioni, tende ad 1.
- la *Tsys*, ovvero la temperatura di sistema, così come viene calcolata dall'eq. 1.2
- la *perdita di guadagno d'antenna* calcolata per le deformazioni geometriche dello specchio
- la cifra di *PWV* (Precipitable Water Vapour)
- l'*opacità atmosferica* allo zenith τ_0
- le *componenti radiali delle velocità* di rotazione, rivoluzione, LSR ed esoplanetarie rispetto all'osservatore e la somma di queste
- gli *shift doppler* espressi sia in canali FFT o PFB, sia in frequenza di cielo e sia come residui rispetto alla frequenza di riga di laboratorio

Inoltre nel logfile vengono salvate altre informazioni quali il nome del file processato, la memoria correntemente utilizzata, il tempo impiegato nel processing, l'RMS finale non pesato e la correlazione dell'RMS con una curva campione al fine di stimare la linearità del sistema in quel set di dati.

```

LOGFILE=D:\ITASEL\OBS\06\processing.log SCROLLBACK BUFFER SIZE= 32766 CHAR
> Current file: D:\ITASEL\OBS\06\47Uma.obs
> Memory allocation: 163840 bytes
> Spectrogram (X,Y): (27,4096)

-----
> Cycl UT Date UT Time RMS On/Off TSys Ant. PWV Tau0 Atm. Wgt vRot vRev vLSR vTOT vExoPl shift dpl lab.frq sky frq frq.err
> ### yyyy.dd.mm:hh:mm:ss Coeff. K Gain mm opac. spc km/s km/s km/s km/s km/s ch MHz MHz MHz
-----
> 0001 2006.016.02:43:45 0,675 1,007 138,46 0,974 10,77 0,1062 0,899 0,00 +0,00896 -14,334 -02,831 -05,156 +00,000 +0000 +00,382 22235,43 22235,462 0,032
> 0002 2006.016.02:50:25 0,757 1,008 148,66 0,976 10,77 0,1062 0,899 0,00 +0,01632 -14,333 -02,831 -05,147 +00,000 +0000 +00,381 22235,43 22235,461 0,031
> 0003 2006.016.02:57:05 0,747 1,001 142,64 0,977 10,77 0,1062 0,899 0,00 +0,02367 -14,331 -02,831 -05,138 +00,000 +0000 +00,381 22235,43 22235,461 0,031
> 0004 2006.016.03:03:45 0,834 1,005 148,83 0,980 10,77 0,1062 0,898 0,00 +0,03099 -14,329 -02,831 -05,129 +00,000 +0000 +00,380 22235,43 22235,460 0,030
> 0005 2006.016.03:10:25 0,734 0,998 146,99 0,982 10,77 0,1062 0,898 0,00 +0,03829 -14,327 -02,831 -05,120 +00,000 +0000 +00,379 22235,43 22235,459 0,029
> 0006 2006.016.03:17:05 0,700 0,996 138,99 0,984 10,77 0,1062 0,898 0,00 +0,04566 -14,326 -02,831 -05,111 +00,000 +0000 +00,379 22235,43 22235,459 0,029
> 0007 2006.016.03:23:45 0,760 1,000 148,50 0,986 10,77 0,1062 0,897 0,00 +0,05279 -14,324 -02,831 -05,102 +00,000 +0000 +00,378 22235,43 22235,458 0,028
> 0008 2006.016.03:30:25 0,743 1,002 142,35 0,988 10,77 0,1062 0,897 0,00 +0,05997 -14,322 -02,831 -05,093 +00,000 +0000 +00,377 22235,43 22235,457 0,027
> 0009 2006.016.03:37:05 0,656 0,998 141,96 0,990 10,77 0,1062 0,897 0,00 +0,06710 -14,320 -02,831 -05,084 +00,000 +0000 +00,377 22235,43 22235,457 0,027
> 0010 2006.016.03:43:45 0,758 1,007 147,87 0,991 10,77 0,1062 0,896 0,00 +0,07418 -14,319 -02,831 -05,075 +00,000 +0000 +00,376 22235,43 22235,456 0,026
> Final RMS (not weighted): 2,394553E-02
> Linearity of RMS (Pearson correlation) over raw 10 spectra: 0,967
> Total number of cycles: 10
> Used cycles: 10
>
> Processing time (s): 11,4525
> Current version: 1.0

$ver
$

```

Fig.1.9 – La finestra di logging è divisa in due parti. In quella alta viene stampato il logfile che tiene traccia di tutte le attività di processing svolte nel corso della sessione. In quella bassa invece l'utente può interrogare il sistema mediante l'uso di un set specifico di comandi. Vedi paragrafo 1.X

Altri utili datalogging sono dedicati al salvataggio automatico su disco dei buffer degli spettri processati. ASTRA per ogni spettro processato salva alcuni file grezzi temporaneamente. Inoltre è possibile eseguire il datalogging anche di tutti gli spettri che compongono un set di dati scegliendo la modalità opportuna dal frame di setup che si trova nel pannello di controllo di ASTRA. Ad esempio è possibile salvare in ASCII automaticamente ciascun blocco separato On, Off e Cal oppure scegliere se salvare ciascun ciclo completo e calibrato. Altre utilità riguardano la scelta del formato del nome file, se con un numero progressivo, un suffisso, oppure una stringa contenente il tempo e l'antenna status di ciascuno spettro. E' altresì possibile scegliere di salvare una parte di spettro indicando nei box gli estremi inizio/fine da utilizzare.

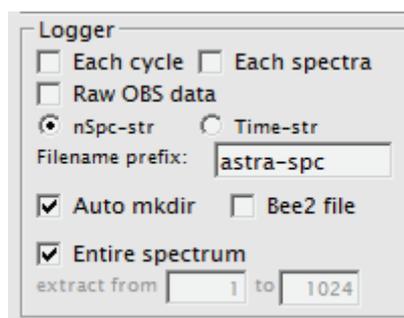


Fig. 1.10 – Frame di setup dedicato allo spectra-logging. E' possibile scegliere varie modalità di salvataggio in formato raw dei dati.

1.7 – Visualizzazione dei dati

La visualizzazione dei dati è di tipo “multi-finestra”, ovvero è possibile tenere nell'area di lavoro contemporaneamente più spettri aperti e lavorare parallelamente su ognuno di essi. Ogni spettro ha una propria finestra di visualizzazione (vedi fig. 1.12) nella quale dalla barra strumenti (vedi fig. 1.11) è possibile accedere a diverse funzioni di visualizzazione avanzata come lo zoom su entrambi gli assi, il salva file (formati disponibili sono BIN, PNG o ASCII), l'undo che consente di annullare l'ultima operazione effettuata sui dati, il clone che permette di duplicare il contenuto della finestra dati in una seconda, il cursor che permette di attivare tramite mouse un puntatore sullo spettro e di ottenere da questo informazioni più dettagliate su frequenze, canali, velocità radiali corrispondenti, ecc., ed infine la funzione units che permette di cambiare l'unità di misura sulle ascisse scegliendo tra canali FFT, frequenza di cielo in MHz, oppure velocità radiali in km/s (sia target-centriche, che rispetto ad un eventuale offset).



Fig.1.11 – Dettaglio della barra strumenti della finestra di visualizzazione

Per ogni finestra di visualizzazione sono disponibili 3 buffer di dati:

1. plottato in verde (vedi fig. 1.12) viene utilizzato prevalentemente per rappresentare lo spettro correntemente processato
2. plottato in rosso, viene utilizzato prevalentemente per graficare la curva polinomiale della baseline che può (a richiesta) essere calcolata sul buffer 1
3. plottato in blu, viene utilizzato prevalentemente per graficare un eventuale maschera che è stata attivata sullo spettro. Una maschera è una funzione a gradino unitario che può essere customizzata simultaneamente su n intervalli diversi dello stesso spettro. La funzione maschera impedisce di utilizzare i punti dello spettro in corrispondenza degli zeri della maschera quando si calcola ad esempio la baseline, ecc. Torna utile per mascherare manualmente alcuni difetti dello spettro, come ad esempio spikes o fluttuazioni di banda che potrebbero inficiare il calcolo di una polinomiale per la baseline spettrale.

Si rimanda al paragrafo successivo per avere altre informazioni sull'utilizzo dei diversi buffer di ogni finestra di visualizzazione.

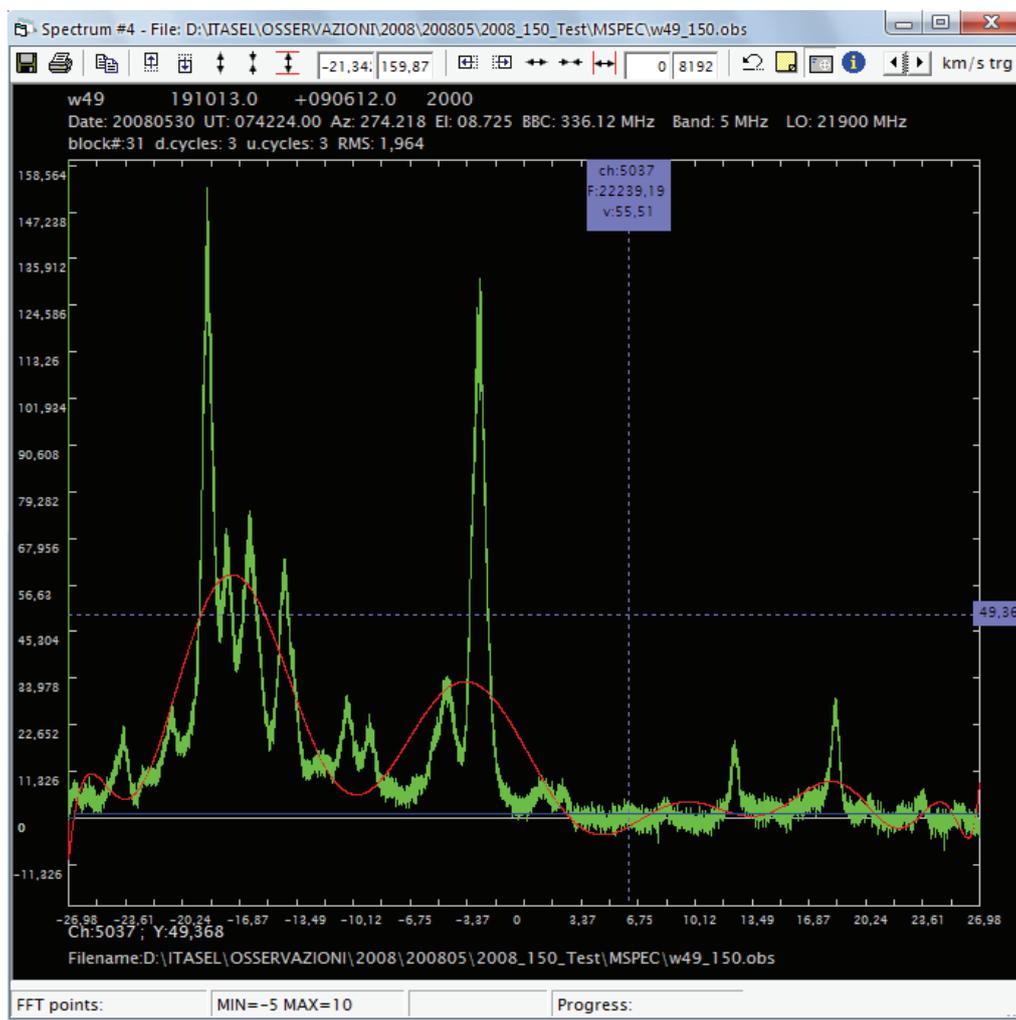


Fig. 1.12 – Finestra di visualizzazione di uno spettro. In alto è visibile la barra delle funzioni immediate come lo zoom sui due assi ed altre funzioni di salvataggio e di lettura dati. Lo spettro nell'esempio è il maser W49 ottenuto con 8192 canali FFT su una banda di 5 MHz. L'unità sulle ordinate è il Kelvin, sulle ascisse i Km/s. Lo zero coincide con la frequenza di cielo del maser posizionata a centro banda.

1.8 – Funzioni da riga di comando

Al momento in cui viene scritto questo documento, ASTRA dispone di diverse funzioni di processing spettrale. Altre sono correntemente allo studio e si aggiungeranno man mano all'elenco. La gran parte delle funzioni di spectra processing vengono applicate da riga di comando utilizzando l'area di input (in basso) della finestra di logfile (vedi fig. 1.9). Digitando il comando man verrà visualizzata una schermata riassuntiva dei comandi attualmente disponibili:

```
> add                average                blackman                bline
> boxcar             clone                  div                     extract
> file              gauss                 gaussian                hamming
> hanning           jansky                kelvin                  legend
> mask              maver                 mult                    onoff
> path              rms                   rmsp2p                  sbline
> sub               tile                   undo                    ver
>
> What manual page do you want?
```

Sempre da riga di comando, è possibile visualizzare il manuale online di ciascun comando digitando `man <comando>`. Segue una breve descrizione dei comandi al momento disponibili:

> **add**

Syntax: add [spectrum1 ID],[spectrum2 ID]

Type: arithmetic

Description: Somma algebricamente canale per canale due spettri.

$$add(n) = spectrum1(n) + spectrum2(n)$$

Output: blank

> **average**

Syntax: average [spectrum1 ID],[spectrum2 ID]

[spectrum1 ID],[spectrum2 ID] spettri a cui si applica

Type: arithmetic

Description: Calcola la media canale per canale di due spettri.

$$average(n) = \frac{spectrum1(n) + spectrum2(n)}{2}$$

Output: blank

> **blackman**

Syntax: blackman [spectrum ID],[winbox]

[spectrum ID] numero di spettro a cui si applica

[winbox] = larghezza della finestra in canali

Type: convolution filtering

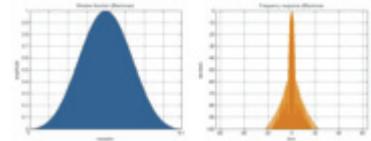
Description: Esegue la convoluzione dello spettro con una finestra di tipo blackman avente una larghezza di N canali.

Example of discrete time window function:

$$w(n) = a_0 - a_1 \cos\left(\frac{2\pi n}{N-1}\right) + a_2 \cos\left(\frac{4\pi n}{N-1}\right)$$

$$a_0 = \frac{1-\alpha}{2}; \quad a_1 = \frac{1}{2}; \quad a_2 = \frac{\alpha}{2}$$

Output: self

> **bline**

Syntax: bline [spectrum ID],[arg]

[spectrum ID] numero di spettro a cui si applica

[arg] = <integer> is the order of polynomial regression

[arg] = "show" show the computed baseline (default)

[arg] = "hide" hide the baseline

Type: statistics

Description: Calcola la regressione di ordine n sullo spettro indicato dall'ID. L'ordine può assumere qualsiasi valore intero fino a 22. La polinomiale risultante viene memorizzata nel buffer 2 dello spettro ID e verrà automaticamente plottata in rosso.

Output: self

> **boxcar**

Syntax: boxcar [spectrum ID],[winbox]

Type: filtering

Description: Esegue il filtraggio boxcar sullo spettro ID con una winbox assegnata. L'algoritmo lavora suddividendo lo spettro formato da N canali in N/winbox segmenti, per ciascun segmento viene calcolato il valor medio e tale valore viene sostituito ad ogni canale appartenente al segmento.

$$\text{boxcar}\left(\text{INT}\frac{n}{i}\right) = \frac{\sum_{n=i}^{i+w-1} \text{spectrum}(n)}{w} \Bigg|_{i=1,1+w,\dots,\text{INT}\left(\frac{n}{w}\right)}$$

Output: self

> **clone**

Syntax: clone [spectrum ID]

Type: utility

Description: Crea un clone dello spettro ID. Al nuovo spettro viene assegnata una finestra di visualizzazione e tutti i buffer dati vengono automaticamente ereditati dallo spettro parent.

Output: blank

> **div**

Syntax: div [spectrum ID],[constant],[output]

[constant] is a real value

[output] = <empty> The result is loaded into ID buffer

[output] = "new" The result is loaded into a new buffer

Type: arithmetic

Description: Divide lo spettro ID per una costante

Output: self, blank

> **extract**

Syntax: extract [single_spectrum]

Type: utility

Description: Estrae un singolo spettro dal piano JTF (Joint Time Frequency) di dati. Lo spettro estratto viene assegnato ad una finestra di visualizzazione.

Output: blank

> **file?**

Syntax: file?

Type: utility

Description: Stampa nel logfile il file dati correntemente caricato in memoria.

Output: logfile

> **gauss**

Syntax: gauss [spectrum ID],[m] or [ini],[fin]

[spectrum ID] numero di spettro a cui si applica

[m] indica di leggere gli estremi di inizio e fine dai marker introdotti mediante l'uso del mouse

[ini],[fin] se non si utilizza l'opzione "m" è possibile delimitare numericamente la parte di spettro su cui eseguire l'elaborazione.

Type: statistical

Description: Esegue la regressione non lineare, in questo caso mediante una funzione gaussiana, al fine di fittare i punti compresi nell'intervallo specificato calcolandone i dati salienti come la larghezza della riga, l'altezza, la posizione. La funzione di fit viene caricata nel buffer 2 dello spettro, quindi plottata in rosso.

Output: self

> **gaussian**

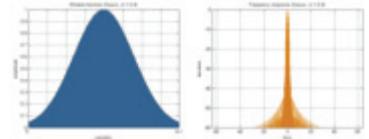
Syntax: gaussian [spectrum ID],[winbox]
 [spectrum ID] numero di spettro a cui si applica
 [winbox] = larghezza della finestra in canali

Type: convolution

Description: Esegue la convoluzione dello spettro con una finestra di tipo gaussiana avente una larghezza di N canali.

Example of discrete time window function:

$$w(n) = e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{n-(N-1)/2}{\sigma(N-1)/2}\right)^2} \quad \sigma \leq 0.5$$



Output: self

> **hamming**

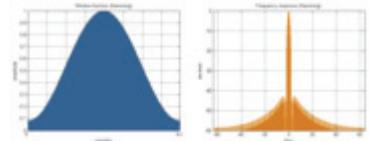
Syntax: hamming [spectrum ID],[winbox]
 [spectrum ID] numero di spettro a cui si applica
 [winbox] = larghezza della finestra in canali

Type: convolution

Description: Esegue la convoluzione dello spettro con una finestra di tipo hamming avente una larghezza di N canali.

Example of discrete time window function:

$$w(n) = 0.53836 - 0.46164 \cos\left(\frac{2\pi n}{N-1}\right)$$



Output: self

> **hanning**

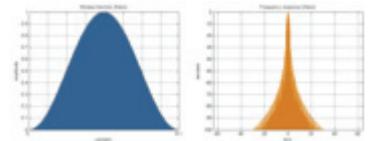
Syntax: hanning [spectrum ID],[winbox]
 [spectrum ID] numero di spettro a cui si applica
 [winbox] = larghezza della finestra in canali

Type: convolution

Description: Esegue la convoluzione dello spettro con una finestra di tipo hanning avente una larghezza di N canali.

Example of discrete time window function:

$$w(n) = 0.5 \left(1 - \cos\left(\frac{2\pi n}{N-1}\right)\right)$$



Output: self

> **jansky**

Syntax: jansky [spectrum ID]

Type: arithmetic

Description: Converte lo spettro da Kelvin in Jansky utilizzando il fattore di guadagno K/Jy.

Output: self

> **kelvin**

Syntax: kelvin [spectrum ID]

Type: arithmetic

Description: Converte lo spettro da Jansky in Kelvin utilizzando il fattore di guadagno K/Jy.

Output: self

> **mask**

Syntax: mask [arg1],[arg2]

[arg1] = [spectrum ID] numero di spettro a cui si applica

[arg1] = "i" indica se la maschera viene utilizzata durante l'integrazione pesata.

[arg2] = [ini_1],[fin_1](,...,[ini_n],[fin_n])

[ini_n],[fin_n] definisce le parti dello spettro su cui attivare la maschera.

[arg] = "hide" Hide the mask, but is still loaded. Use 'erase' option.

[arg] = "show" Plot last actived mask. Use 'mask' to redefine a new pattern.

[arg] = "erase" Erase the mask pattern.

Type: utility

Description: Il comando mask definisce una funzione gradino che vale 0 in tutti gli intervalli definiti dagli estremi ini,fin e vale 1 nel resto dello spettro. La maschera viene utilizzata nel calcolo della funzione di baseline ed in altre operazioni in cui torna utile schermare una o più porzioni della banda poiché contengono ad esempio interferenze. La funzione di mask viene caricata nel buffer 3 dello spettro, quindi plottata in blu.

Output: self

> **maver**

Syntax: maver [spectrum ID],[winbox]

[spectrum ID] numero di spettro a cui si applica

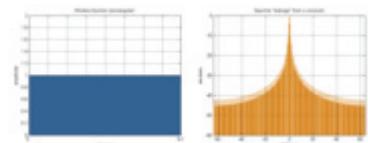
[winbox] = larghezza della finestra in canali

Type: convolution

Description: Esegue la moving average (media mobile) dello spettro, equivalente ad una convoluzione con una finestra di tipo rettangolare avente una larghezza di N canali.

Example of discrete time window function:

$$w(n) = 1$$



Output: self

> **mult**

Syntax: mult [spectrum ID],[constant],[output]

[constant] is a real value

[output] = <empty> The result is loaded into ID buffer

[output] = "new" The result is loaded into a new buffer

Type: arithmetic

Description: Moltiplica lo spettro ID per una costante

Output: self, blank

> **onoff**

Syntax: onoff [spectrum ID]

Type: utility

Description: Visualizza in un'altra finestra gli spettri On ed Off separatamente utilizzando due buffer (1 e 2). In verde viene plottata

l'integrazione solo degli spettri on, eventualmente pesati e dedopplerati. In rosso analogamente viene plottata l'integrazione degli off. Le unità di misura sulle ordinate sono i conteggi.

Output: blank

> **path?**

Syntax: path?

Type: utility

Description: Stampa nel logfile il percorso delle directory correntemente utilizzato per leggere/scrivere dati.

Output: logfile

> **rms**

Syntax: rms [spectrum ID],[arg]

[spectrum ID] numero di spettro a cui si applica

[arg] = [ini],[fin] definisce le parti dello spettro su cui attivare la maschera.

[arg] = "m" or "mouse" indica di leggere gli estremi di inizio e fine dai marker introdotti mediante l'uso del mouse

Type: statistics

Description: Il comando rms calcola l'errore quadratico medio sullo spettro a partire dall'intervallo definito dagli estremi ini e fin. Gli estremi possono essere definiti numericamente immettendo i valori nella riga di comando, oppure possono essere letti dai marker preventivamente definiti tramite il mouse sullo spettro attivando la funzione crocicchio e cliccando con il tasto destro per fissare ogni marker. Il risultato viene stampato sul logfile.

Output: logfile

> **rmsp2p**

Syntax: rmsp2p [spectrum ID],[arg]

[spectrum ID] numero di spettro a cui si applica

[arg] = [ini],[fin] definisce le parti dello spettro su cui attivare la maschera.

[arg] = "m" or "mouse" indica di leggere gli estremi di inizio e fine dai marker introdotti mediante l'uso del mouse

Type: statistics

Description: Il comando rmsp2p calcola l'RMS sullo spettro a partire dall'intervallo definito dagli estremi ini e fin. A differenza dal comando rms, la funzione rmsp2p calcola l'RMS come il rapporto tra il picco-picco ed il fattore di forma d'onda, che nel caso di rumore bianco è la radice quadrata di 20.

Gli estremi possono essere definiti numericamente immettendo i valori nella riga di comando, oppure possono essere letti dai marker preventivamente definiti tramite il mouse sullo spettro attivando la funzione crocicchio e cliccando con il tasto destro per fissare ogni marker. Il risultato viene stampato sul logfile.

Output: logfile

> **sbline**

Syntax: sbline [spectrum ID]

[spectrum ID] numero di spettro a cui si applica

Type: arithmetic

Description: Eseguie la sottrazione della baseline calcolata con il comando bline dallo spettro. Lo spettro risultante viene memorizzato nel buffer 1

dello spettro ID. La funzione di baseline rimane ancora in memoria nel buffer 2.

Output: self

> **sub**

Syntax: sub [spectrum1 ID],[spectrum2 ID]

Type: arithmetic

Description: Sottrae algebricamente canale per canale due spettri.

Output: blank

> **tile**

Syntax: tile [n_rows],[m_columns]

Type: utility

Description: Dispone tutte le finestre attive di visualizzazione spettri in n righe ed m colonne effettuando automaticamente il resizing di ciascuna.

Output: self

> **undo**

Syntax: undo [spectrum ID]

Type: utility

Description: La funzione undo consente di annullare l'ultima operazione eseguita sullo spettro ID a cui viene applicata. Al momento il software consente di annullare per ogni spettro le ultime 10 operazioni.

Output: blank

> **ver**

Description: Visualizza la versione corrente del software e delle componenti installate.

Output: logfile

1.9 – Applicazioni

ASTRA può essere utilizzato in quei casi dove si rende necessario eseguire un post-processing di calibrazione e filtraggio automatico su un elevato numero di spettri. Inoltre presenta diverse funzioni che consentono di portare a termine anche le post elaborazioni di line detection sui dati già calibrati. Incorporando un versatile *dedoppler engine*, ASTRA consente di applicare sui dati una o più curve derivanti dai modelli orbitali dei corpi. In particolare si mostra abbastanza versatile nella parametrizzazione dell'orbita di oggetti esoplanetari per i quali può diversificare uno o più parametri orbitali e generarne la curva delle velocità radiali per l'osservatore.

1.9.1 – Esempio 1. Post-processing su spettri planetari

Nel primo esempio verrà illustrata la procedura di post elaborazione dati eseguita su uno scan OBS acquisito mediante lo spettrometro ad alta risoluzione SPECTRA-1. Una volta caricato il file, nel log è possibile esaminare la struttura, la Tsys, l'RMS ed eventuali cicli corrotti. Cliccando su **PLOT RMS** nel pannello di controllo è possibile visualizzare il grafico di figura 1.14 che consente di visualizzare l'andamento dell'RMS con il tempo (quindi con gli spettri), ed il residuo di questi una volta sottratto un fit lineare.

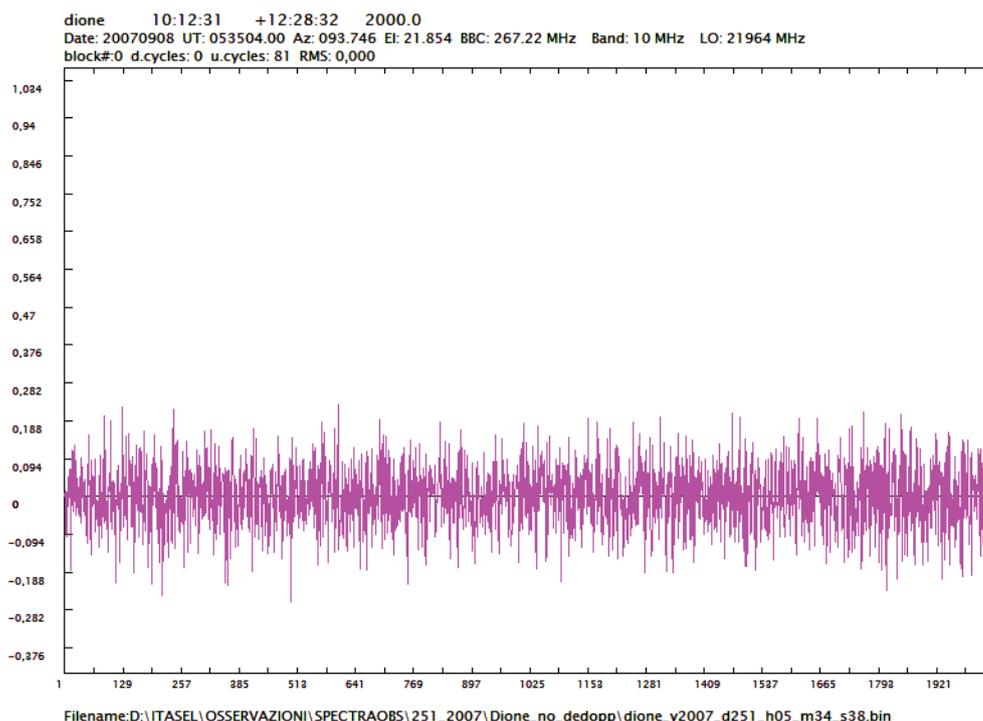


Fig. 1.13 – Spettro acquisito con lo spettrometro SPECTRA-1 l'8 settembre 2007.

Dal pannello di controllo, cliccando su **PLOT Tsys** è possibile visualizzare l'andamento della temperatura di sistema (Tsys) in funzione del tempo. Il grafico mostra anche una stima della temperatura di ricevitore, ottenuta sottraendo dalla Tsys il termine di spillover ed il contributo della temperatura equivalente di rumore per l'opacità atmosferica. Trattandosi di spettri il cui comportamento è riconducibile a quello del rumore bianco, durante il processo di integrazione tale rumore (ovvero l'RMS) dovrà variare secondo una legge che va con la radice quadrata del numero di spettri integrati. Il test di linearità delle misure spettrali acquisite dal sistema può essere effettuato calcolando il coefficiente di correlazione tra l'RMS integrato progressivamente nel tempo ed una curva di secondo ordine che fitta i dati. Ciò si ottiene cliccando nella finestra Spectra Processing in **PLOT WEIGHTED TSYS**. Oltre ad avere il risultato grafico visibile in figura 1.14 c, nel logfile verranno stampate alcune salienti informazioni sull'analisi dell'RMS:

```
> Linearity of RMS (Pearson correlation) over selected spectra: 0,997
> Final RMS (weighted): 0,2479281
> Weighted RMS regression:
> Points=80
> C(0) = 7,30267051431445E-02
> C(1) = 4,29436359068359E-03
> C(2) = -2,74171742384568E-05
```

La prima riga indica il risultato della correlazione, calcolata mediante l'algoritmo di Pearson (vedi Rif. 1.5). Un risultato prossimo ad 1 indica un'ottima correlazione tra l'RMS integrato ed il suo best fit di secondo ordine. La seconda riga restituisce il valore dell'RMS finale pesato con un set di coefficienti calcolati per ogni spettro ed utilizzati anche per l'integrazione pesata dello spettro finale. Infine le ultime 5 righe restituiscono i parametri della regressione effettuata, come il numero di punti (80 in questo caso, tanti quanto sono gli spettri), ed i 3 coefficienti della polinomiale di 2° ordine. Dopo una prima analisi sugli RMS e sulle Tsys degli spettri si procede con la scrematura di quelli che non sembrano essere utilizzabili per la successiva integrazione (vedi paragrafo 1.4.1 per ulteriori dettagli). Mediante il pannello visibile in fig.1.3 è possibile settare le soglie minima e massima delle temperature di sistema. La soglia minima consentirà di tagliar fuori eventuali spettri, calibrati male, aventi una Tsys inferiore a quella del ricevitore (circa 100 Kelvin), mentre la soglia massima eliminerà quegli spettri acquisiti in condizioni osservative non ottimali (con Tsys alte) ed

anche quelli danneggiati che indicano T_{sys} fuori range (di ad esempio migliaia di K). Una volta eseguita la selezione degli spettri, si può procedere con il dedoppleraggio (secondo quanto descritto nel paragrafo 1.5.3) e con l'integrazione mediante il tasto **APPLY**.

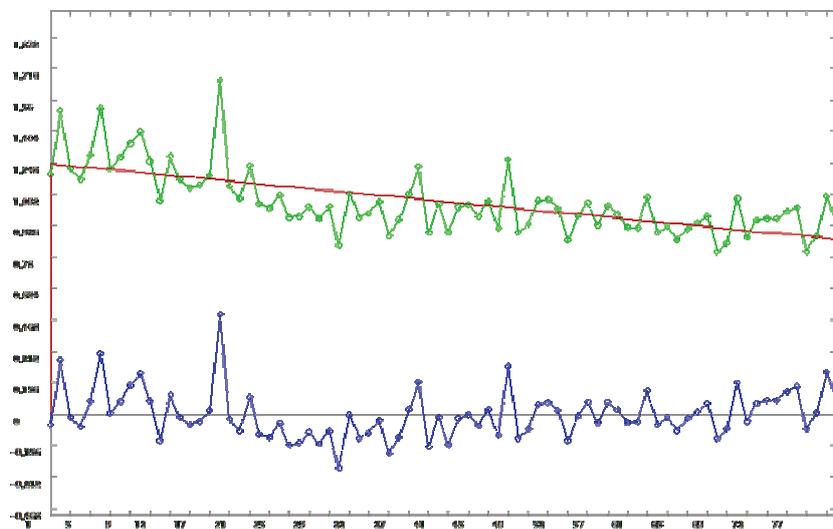
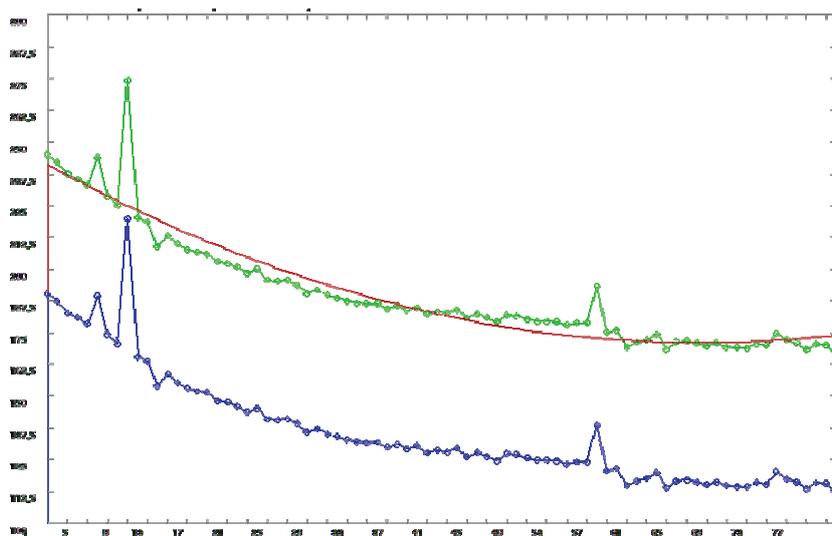
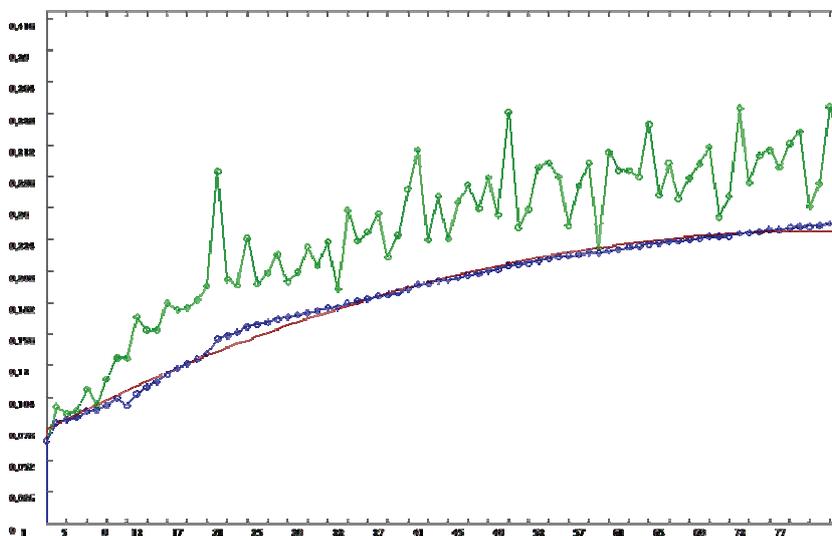


Fig.1.14 - (a) In alto, grafico degli RMS grezzi (non pesati) in funzione del tempo. Sull'asse delle x il numero progressivo degli spettri. Sull'asse delle y, in verde sono plottati gli RMS espressi in Kelvin, in rosso c'è il fit lineare degli RMS, in blu il residuo degli RMS.



(b) Al centro, grafico della temperatura di sistema (T_{sys}) in funzione del tempo. Sull'asse delle x il numero progressivo degli spettri. Sull'asse delle y, in verde sono plottate le T_{sys} in Kelvin, in rosso c'è il fit di secondo ordine, in blu invece c'è una stima della temperatura di ricevitore. I tre picchi anomali indicano la presenza di spettri probabilmente danneggiati che verranno eliminati in fase di pre-integrazione.



(c) In basso, grafico dell'RMS. In verde vengono plottati gli RMS pesati ma non integrati; in blu viene plottato l'RMS integrato nel tempo; in rosso viene plottato il fit di secondo ordine degli RMS integrati.

```

> Current file: D:\ITASEL\OSSERVAZIONI\SPECTRAOBS\251_2007\dione_y2007_d251_h05_m34_s38.obs
> Memory allocation: 81920 bytes
> Spectrogram (X,Y): (80,2048)
>
-----
> Cycl UT Date UT Time RMS On/Off TSys Ant. PWV Tau0 Atm.
> #### yyyy.dd.hh:mm:ss Coeff. K Gain mm opac.
-----
> 0001 2007.251.05:35:04 1,193 1,001 245,10 0,791 16,89 0,1484 0,671
> 0002 2007.251.05:38:28 1,509 1,001 242,05 0,798 16,89 0,1484 0,678
> 0003 2007.251.05:41:47 1,219 1,002 237,48 0,804 16,89 0,1484 0,684
> 0004 2007.251.05:45:15 1,168 1,001 235,55 0,811 16,89 0,1484 0,691
> 0005 2007.251.05:48:41 1,290 1,001 232,97 0,818 16,89 0,1484 0,697
> 0006 2007.251.05:52:05 1,520 1,002 243,92 0,824 16,89 0,1484 0,702
> 0007 2007.251.05:55:22 1,219 1,001 228,74 0,830 16,89 0,1484 0,708
> 0008 2007.251.05:58:43 1,275 1,002 225,10 0,836 16,89 0,1484 0,713
> 0009 2007.251.06:02:02 1,347 1,001 274,33 0,842 16,89 0,1484 0,718
> 0010 2007.251.06:05:25 1,402 1,000 220,06 0,847 16,89 0,1484 0,723
> 0011 2007.251.06:08:42 1,259 1,001 218,37 0,853 16,89 0,1484 0,727
> 0012 2007.251.06:12:28 1,061 1,001 208,81 0,859 16,89 0,1484 0,733
> 0013 2007.251.06:16:09 1,281 1,001 213,14 0,864 16,89 0,1484 0,737
> 0014 2007.251.06:19:30 1,166 1,001 209,95 0,869 16,89 0,1484 0,741
> 0015 2007.251.06:22:50 1,126 1,002 207,75 0,874 16,89 0,1484 0,745
> 0016 2007.251.06:26:09 1,138 1,001 206,73 0,879 16,89 0,1484 0,748
> 0017 2007.251.06:29:33 1,185 1,001 206,03 0,884 16,89 0,1484 0,752
> 0018 2007.251.06:32:49 1,660 1,007 202,81 0,888 16,89 0,1484 0,756
> 0019 2007.251.06:36:13 1,132 1,002 202,25 0,893 16,89 0,1484 0,759
> 0020 2007.251.06:39:28 1,071 1,000 200,79 0,897 16,89 0,1484 0,762
> 0021 2007.251.06:42:52 1,234 1,001 198,49 0,901 16,89 0,1484 0,765
> 0022 2007.251.06:46:09 1,045 1,002 199,85 0,905 16,89 0,1484 0,768
> 0023 2007.251.06:49:31 1,025 1,001 195,62 0,909 16,89 0,1484 0,771
> 0024 2007.251.06:52:51 1,090 1,002 195,24 0,913 16,89 0,1484 0,774
> 0025 2007.251.06:56:09 0,978 1,002 195,60 0,917 16,89 0,1484 0,777
> 0026 2007.251.06:59:32 0,984 1,002 193,81 0,920 16,89 0,1484 0,779
> 0027 2007.251.07:02:51 1,030 1,002 190,38 0,924 16,89 0,1484 0,782
> 0028 2007.251.07:06:11 0,970 1,001 191,77 0,927 16,89 0,1484 0,784
> 0029 2007.251.07:09:30 1,029 1,002 189,79 0,931 16,89 0,1484 0,787
-----
> 0061 2007.251.08:57:30 0,946 1,002 172,15 0,989 16,89 0,1484 0,831
> 0062 2007.251.09:00:53 0,946 1,002 174,31 0,990 16,89 0,1484 0,832
> 0063 2007.251.09:04:10 0,946 1,002 168,44 0,991 16,89 0,1484 0,832
> 0064 2007.251.09:07:31 0,946 1,002 171,24 0,991 16,89 0,1484 0,833
> 0065 2007.251.09:10:50 0,946 1,002 171,71 0,992 16,89 0,1484 0,834
> 0066 2007.251.09:14:14 0,946 1,002 170,87 0,992 16,89 0,1484 0,834
> 0067 2007.251.09:17:30 0,946 1,002 169,82 0,993 16,89 0,1484 0,835
> 0068 2007.251.09:20:54 0,946 1,002 170,78 0,993 16,89 0,1484 0,835
> 0069 2007.251.09:24:19 0,946 1,002 169,28 0,994 16,89 0,1484 0,836
> 0070 2007.251.09:27:47 0,946 1,002 169,12 0,994 16,89 0,1484 0,836
> 0070 2007.251.09:27:47 1,074 1,002 169,12 0,994 16,89 0,1484 0,836
> 0071 2007.251.09:31:07 0,879 1,002 168,80 0,994 16,89 0,1484 0,836
> 0072 2007.251.09:34:35 0,964 1,002 170,54 0,995 16,89 0,1484 0,837
> 0073 2007.251.09:38:02 0,972 1,002 169,89 0,995 16,89 0,1484 0,837
> 0074 2007.251.09:41:22 0,969 1,001 174,76 0,995 16,89 0,1484 0,838
> 0075 2007.251.09:44:46 1,007 1,002 172,01 0,996 16,89 0,1484 0,838
> 0076 2007.251.09:48:03 1,027 1,002 170,77 0,996 16,89 0,1484 0,838
> 0077 2007.251.09:51:21 0,809 1,003 168,29 0,996 16,89 0,1484 0,838
> 0078 2007.251.09:54:45 0,887 1,003 170,47 0,996 16,89 0,1484 0,839
> 0079 2007.251.09:58:03 1,084 1,002 170,24 0,996 16,89 0,1484 0,839
> 0080 2007.251.10:01:24 0,946 1,002 165,63 0,996 16,89 0,1484 0,839
> Final RMS (not weighted): 0,2479281
> Linearity of RMS (Pearson correlation) over raw 80 spectra: 0,997
> Total number of cycles: 80
> Used cycles: 80
>
> Processing time (s): 32,64025

```

Tab.1.5 – Estratto dal logfile dopo l'apertura del set dati. Ogni ciclo completo occupa una riga, numerate dall'1 all'80 quanto sono i cicli. Le colonne indicano il tempo in UT (con il DOY, Day Of Year), l'RMS in Kelvin di ogni singolo spettro, il coefficiente di normalizzazione On/Off, la temperatura di sistema Tsys in Kelvin, il guadagno d'antenna per deformazioni geometriche dello specchio, la cifra del Precipitable Water Vapour, il corrispettivo valore della tau allo zenith e dell'opacità atmosferica all'elevazione per ogni spettro. Alla fine viene calcolato e stampato nel log file il valore dell'RMS integrato ed il coefficiente di correlazione dell'RMS con una curva di secondo ordine.

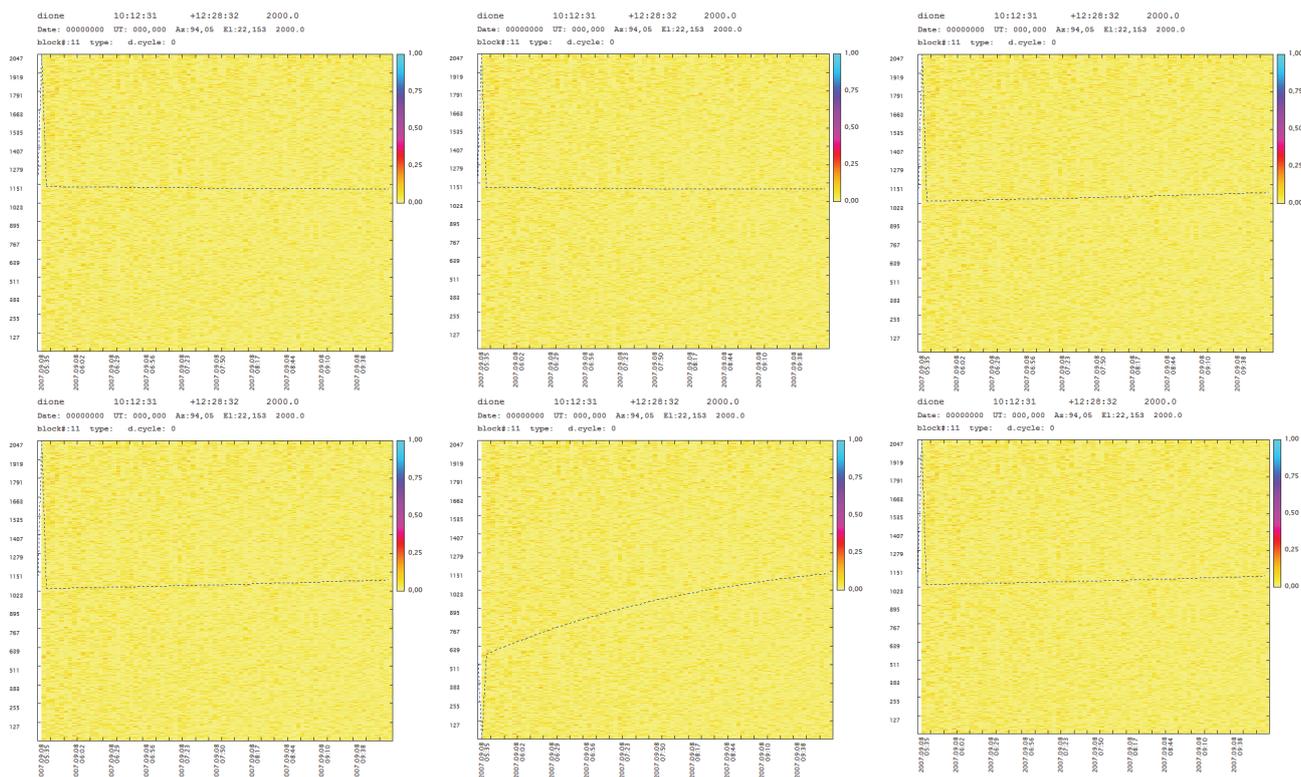


Fig.1.15 – Grafici tempo frequenza con sovrapposte alcune curve di velocità radiali. Partendo dall'alto e procedendo da sinistra verso destra troviamo la curva per Saturno, Titano, Dione, Hyperione, Atlas, Encelado. In tutti i grafici sull'asse delle ascisse c'è il tempo, mentre sulle ordinate c'è la frequenza.

Lo spettro, così integrato e pesato, può essere sottoposto alle successive operazioni di normalizzazione:

- definizione di una eventuale maschera con il comando `mask` in concomitanza di spikes, interferenze o anche strutture spettrali già visibili
- calcolo della baseline con il comando `bline`. La definizione di una eventuale maschera preserverà la baseline dai canali schermati.
- rimozione della baseline mediante il comando `sbline`. Lo spettro, se tutte le operazioni sono state eseguite correttamente, ora dovrà presentare una media nulla.

Successivamente alle operazioni di calibrazione e normalizzazione dello spettro si procede con l'estrazione di eventuali signature spettrali misurandone le caratteristiche di riga.

Per eseguire queste operazioni ASTRA dispone di un parco funzioni di spectra processing che operano:

- filtraggio spaziale dello spettro (ad esempio mediante boxcar parametrizzabili)
- filtraggio frequenziale mediante la convoluzione dello spettro con dei kernel predefiniti (ad esempio moving average con finestre rettangolare, di hanning, hamming, blackman, gaussian, ecc.)
- misura dell'RMS dello spettro filtrato, mediante la funzione `rmisp2p` che richiede la definizione dell'area di spettro da includere nel calcolo. Tale definizione può essere fatta manualmente oppure tramite il mouse e la funzione `crocchio`. Di seguito il risultato dell'RMS così calcolato (in kelvin):

```
> [SPC_1] RMS calculated:
>   Analyzing window:
>     Initial ch: 613
>     Final ch: 1495
>     Window width (ch): 883
>     Spectrum RMS: 1,68304506955102E-02
```

- misura delle caratteristiche di riga mediante regressione non-lineare di una gaussiana. La funzione restituisce la posizione, la larghezza e l'altezza di un profilo di riga.

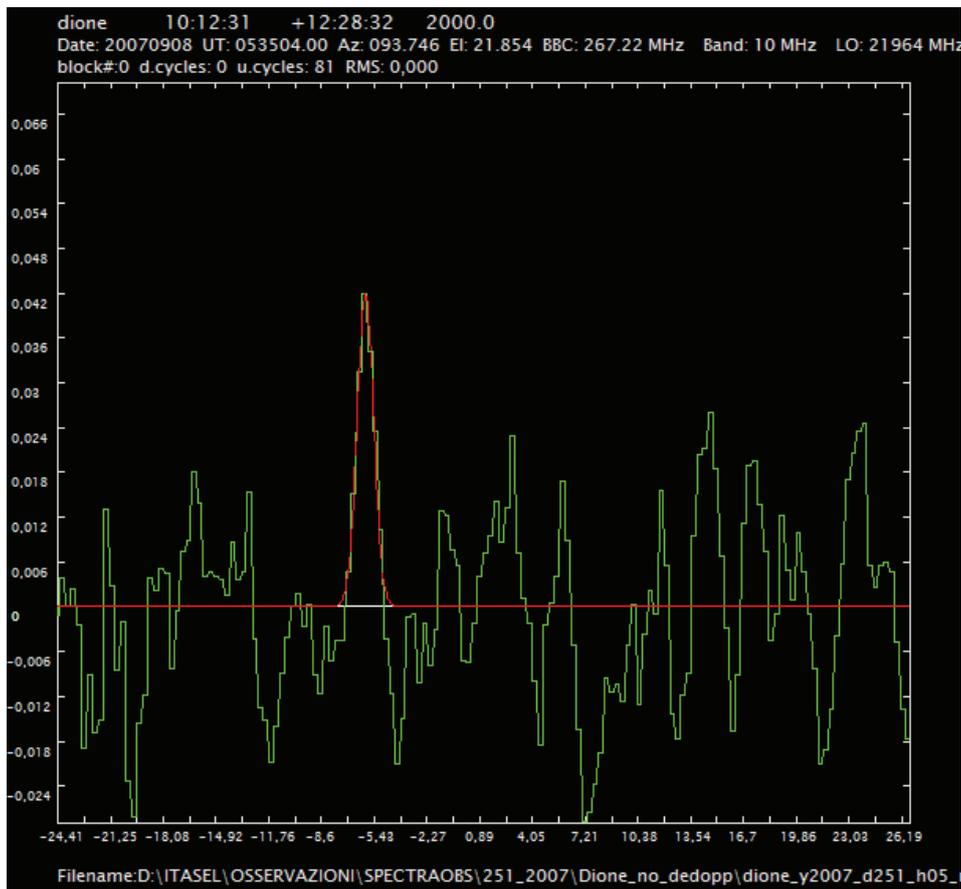


Fig. 1.16 – Fit gaussiano (in rosso) applicato allo spettro su cui era stata applicata una boxcar da 5 punti.

Il fit gaussiano sul profilo della struttura ha restituito i seguenti parametri di riga:

```
> [SPC_1] Gaussian fit:
>   Fitting window:
>     Initial ch: 630
>     Final ch: 762
>     Window width (ch): 133
>   Gaussian fit coefficients:
>     Function:  $y = A \cdot \exp(- (x - \mu)^2 / (2 \cdot \sigma^2))$ 
>     Line intensity (A) = 0,042
>     Ch. position ( $\mu$ ) = 700,916
>     Line width ( $\sigma$ ) = -7,481
>   Statistical analysis:
>     Spectrum RMS: 0,017 K
>     Line Sigma (#RMS): 2,475
```

che indicano una riga da 2,4 sigma, larga circa 15 canali, centrata al canale 700, che nel nostro caso con 2048 canali su una banda da 5 MHz (2,44 kHz/ch) equivale ad una larghezza di riga di 37 kHz circa a metà potenza, avente una velocità radiale di circa -6 km/s rispetto a quella di Dione (target per cui era stato calcolato il doppler e centrata la banda).

1.9.1 – Esempio 2. Tracking doppler e dati di radio-scienza.

Il secondo esempio riguarda la post-elaborazione di dati provenienti da esperimenti di *tracking frequenziale* di sonde spaziali, operazioni richieste in genere durante gli esperimenti di radioscienza. ASTRA prevede un tool che consente l'elaborazione di un segnale acquisito nel dominio del tempo, da cui, mediante delle FFT o PFB software, vengono estratti gli spettri da processare. Nel caso

specifico ci occuperemo di un segnale già nel dominio della frequenza, ovvero di spettri acquisiti da uno spettrometro hardware (nella fattispecie trattasi di SPECTRA-1) in un formato dati OBS.

Durante un esperimento di radioscienza viene registrato il segnale di una sonda spaziale che trasmette dei link di telemetria. Ciò consente lo studio del mezzo attraversato dal segnale prima di giungere alle antenne di Terra. Lo scopo di questi esperimenti può spaziare dall'analisi ionosferica ed atmosferica di un pianeta, di una nube di plasma o di un corpo cometario, allo studio delle onde gravitazionali o di anomalie del campo gravitazionale dei corpi del Sistema Solare. Per ottenere ciò si analizza la variazione di fase e di frequenza nel tempo dei segnali di downlink della sonda. Strumentalmente ciò comporta di realizzare una accurata misura tempo-frequenziale del segnale ricevuto dal radiotelescopio. Tale misura, una volta calibrata, deve essere depurata dagli effetti deleteri dell'atmosfera terrestre, compensata per il doppler dell'osservatore e normalizzata rispetto ad altri fattori strumentali.

Il software ASTRA, nella sua versione odierna, offre alcuni tools di post-elaborazione su questo tipo di misure, a partire dalle funzioni di conversione, calibrazione e normalizzazione degli spettri per poi arrivare al tracking frequenziale mediante il calcolo e l'applicazione di opportune curve di velocità. In questo esempio si è voluto mostrare un esperimento di "tracking frequenziale" di una delle sonde spaziali più lontane e più difficili ormai da rivelare, la *Voyager 1*. La sonda al momento si trova a oltre 106 Unità Astronomiche dalla Terra. La telemetria in banda X (ad una frequenza di 8.42 GHz, con un datarate di 160 bit/s), è ancora attiva. I dati vengono trasmessi attraverso l'HGA (High gain Antenna) da 3.7 metri.

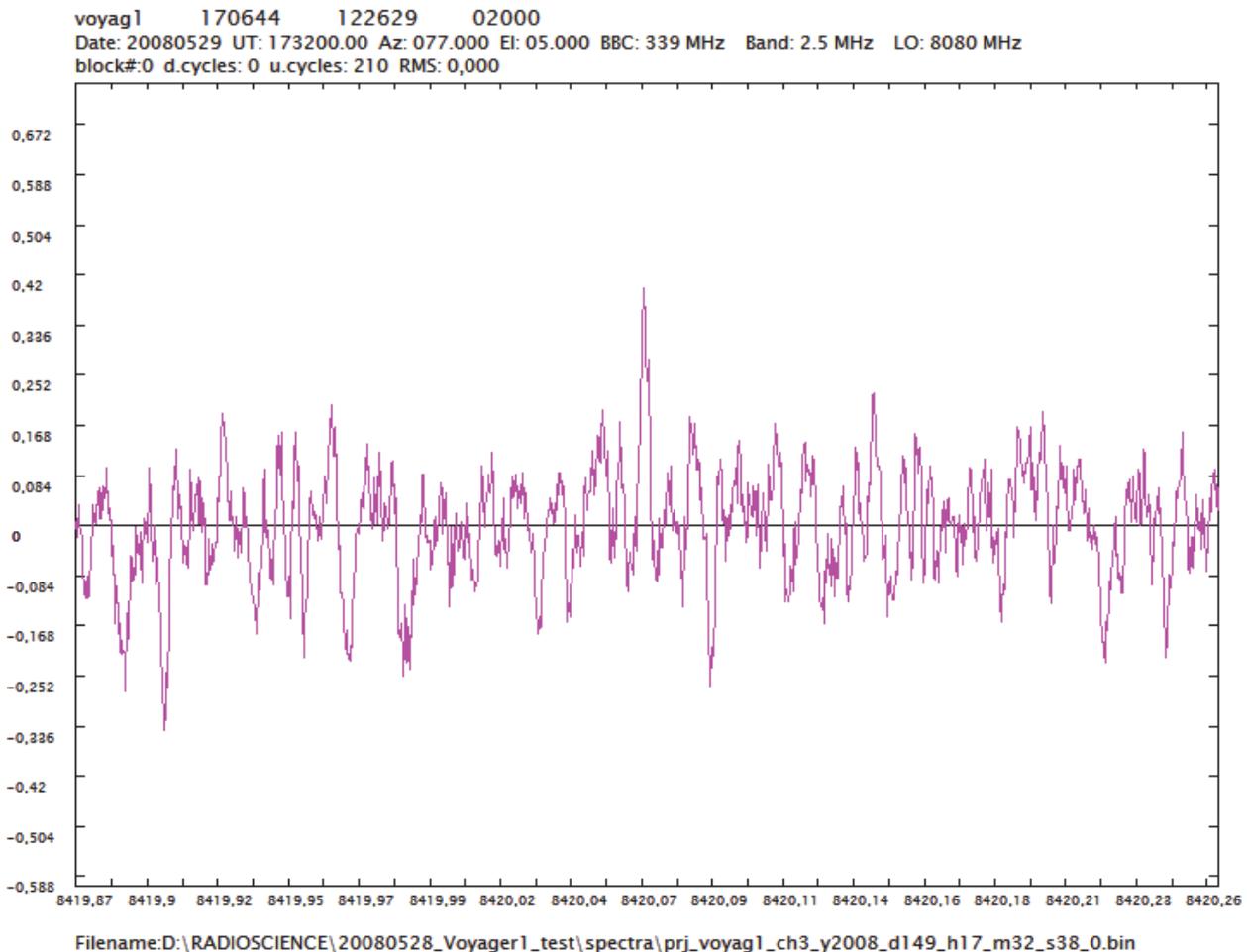


Fig.1.17 – Spettro della sonda Voyager-1 ottenuto con lo spettrometro ad alta risoluzione SPECTRA-1 il 28 maggio del 2008 con il radiotelescopio da 32 metri di Medicina, ad una frequenza di 8.4 GHz, con un tempo di integrazione di 9 ore.

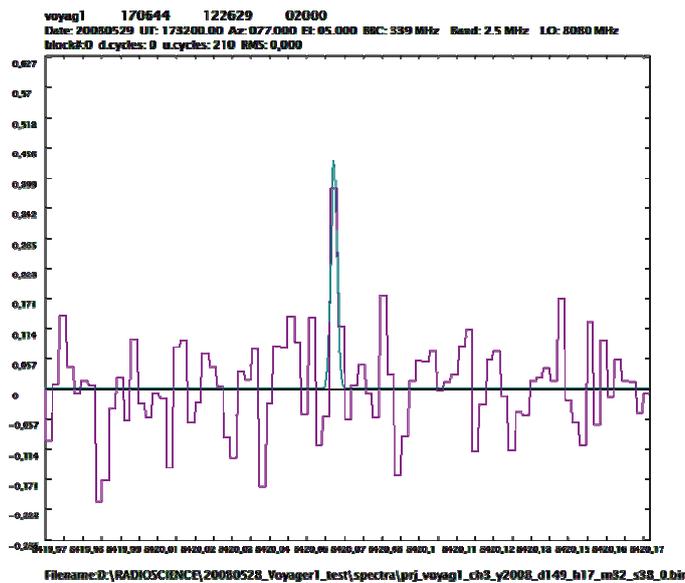


Fig.1.18 - A sinistra una elaborazione boxcar (finestra da 8 punti) del segnale di telemetria di Voyager-1. In azzurro chiaro è plottato un fit gaussiano del profilo della riga. Lo spettro così processato ha un RMS di 0,12 K. Il fit ha restituito un rapporto segnale rumore di 3,4 sigma

Lo spettro di fig. 1.17 è il risultato di 9 ore di integrazione complessiva, che corrispondono circa 3h 40m di integrazione in posizione on source. Con procedure analoghe a quanto descritto nel paragrafo precedente, le oltre 9 ore di osservazione hanno consentito l'integrazione di 210 cicli completi di On-Off-Cal. Ecco un dettaglio del logfile di ASTRA:

```
> Final RMS (not weighted): 2,519098
> Linearity of RMS (Pearson correlation) over raw 210 spectra: 0,974
> Total number of cycles: 210
> Used cycles: 210
```

Lo spettro finale ha un RMS (non pesato) di 2,5 K, mentre il coefficiente di linearità delle misure mostra 0.974, prossimo ad 1 quindi abbastanza buono. Sullo spettro è stato eseguito il dedoppleraggio a partire dalla curva delle velocità radiali ottenute da HORIZONS. Successivamente, al fine di evidenziare la presenza del tono di telemetria sono stati utilizzati (in due buffer uguali e separati) due tipi di filtro: una moving average (vedi fig.1.17) ed una boxcar (vedi 1.18). Per quest'ultima il calcolo dell'RMS pesato e processato (rmsp2p) ha restituito:

```
> [SPC_1] RMS calculated:
> Analyzing window:
> Initial ch : 3405
> Final ch : 4097
> Window width (ch): 693
> Spectrum RMS: 0,126 K
```

Per il calcolo dei parametri di riga invece è stata utilizzata la funzione gauss dopo aver preventivamente impostato tramite il cursore del mouse la regione d'interesse (*funzione crocicchio*). La funzione ha così restituito (curva in azzurro nella fig. 1.18):

```
> [SPC_1] Gaussian fit:
> Fitting window:
> Initial ch: 3469
> Final ch: 3525
> Window width (ch): 57
> Gaussian fit coefficients:
> Function: y = A*exp(-(x-mu)^2 / (2*sigma^2))
> Line intensity (A) = 0,431
> Ch. position (mu) = 3494,149
> Line width (sigma) = -3,288
> Statistical analysis:
> Spectrum RMS: 0,126
> Line Sigma (#RMS): 3,416
```

Il tono di telemetria della Voyager-1 ha un rapporto S/N di 3.4 in uno spettro con un RMS di 0.126 K. Il setup utilizzato prevedeva una PFB da 8192 canali su una banda di 2.5 MHz, con una risoluzione di 305 Hz/ch. Sullo spettro integrato il tono è centrato al canale 3494, non è monocromatico ma presenta un profilo avente una larghezza di circa 7 canali (circa 2.1 kHz).

Riferimenti

[1.1] Manuale dell'antenna di Medicina, cap.5 Efficienza e Temperature, sito web INAF-IRA:
<http://www.med.ira.cnr.it/ManualeMedicina/5.%20Efficienza.htm>

[1.2] Performance estimation at 90GHz (3.3mm) of the Medicina and Noto sites, A. Orfei, Rapporto Interno IRA 418/08.

[1.3] Calibrazioni di guadagno dei ricevitori VLBI di Medicina, A. Orlati, G. Maccaferri, Rapporto Interno IRA 341/03.

[1.4] The Extrasolar Planet ϵ Eridani b Orbit and Mass, Benedict, G. F. et al, American Astronomical Society, DPS meeting #38, #10.09, 2006

[1.5] Pearson Correlation algorithm, Wikipedia, <http://en.wikipedia.org/wiki/Correlation>