

ALMA MATER STUDIORUM
UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

SCUOLA DI INGEGNERIA E ARCHITETTURA

-Campus di Forlì-

LAUREA TRIENNALE in
INGEGNERIA AEROSPAZIALE

Classe: L-09

TESI DI LAUREA in:

Meccanica Orbitale

**Analisi di Registrazioni Delta-DOR
tramite Antenne VLBI**

CANDIDATO

Angelica Cortellini

SUPERVISORE

Paolo Tortora

CO-SUPERVISORE

Francesco Fiori

N° Sessione III

Anno Accademico 2022/2023

Sommario

Il numero di ricevitori disponibili per il tracking di missioni nello spazio profondo risulta, a volte, inferiore alle richieste di puntamento ricevute. Per incrementare la quantità di antenne compatibili con tale tipologia di missione, è stata realizzata una ricerca riguardante la fattibilità di una misurazione Delta-DOR tramite due antenne VLBI prestabilite (il ricevitore del radiotelescopio di Medicina e l'antenna ad alto guadagno di Noto). Attraverso un correlatore sviluppato da un progetto ESA, sono state analizzate le registrazioni del segnale proveniente dallo spacecraft GAIA di ESA e da una quasar di riferimento (utilizzata come calibratore). Tale segnale è stato tradotto dal formato VDIF in RDEF, compatibile con il codice ESA; in seguito, attraverso la correlazione incrociata del segnale, sono state estratte le osservabili DOR relative alla sonda e alla quasar. Il valore di ritardo temporale atteso è stato confrontato con quello ottenuto attraverso il software di determinazione orbitale MONTE di NASA. L'output delle analisi mostra valori compatibili con i risultati del modello dinamico, ponendo, così, le prime conferme sulla fattibilità dell'utilizzo di sole antenne VLBI per la realizzazione di misure Delta-DOR.

Ringraziamenti

Ringrazio Francesco, una guida coerente e presente, tutti gli amici che mi sono stati vicini durante questo percorso, Simone e la mia famiglia.

Indice

Sommario	i
Ringraziamenti	iii
Acronimi	vii
1 Introduzione	1
1.1 Tecniche radiometriche per il Deep Space Tracking	3
1.1.1 Ranging	3
1.1.2 Doppler	5
1.1.3 Delta-DOR	8
1.1.4 Antenne VLBI	17
2 Acquisizione dei dati	19
2.1 Preparazione di una schedula di registrazione	19
2.2 Registrazioni	22
2.3 Formato dei dati di registrazione	25
2.3.1 Formato VDIF	26
2.3.2 Formato RDEF	29
3 Analisi dati	33
3.1 Correlazione incrociata	33
3.2 Studio dell'offset in frequenza	40
3.3 Input del correlatore	42
4 Risultati	47
Conclusioni	55
Appendice	57
4.1 Grafici "waterfall" delle registrazioni attuate ai ricevitori di Medicina e Noto il 22 dicembre 2020	57

Lista delle figure	79
Lista delle tabelle	80
Bibliografia	85

Acronimi

DOR	Differential One-way Ranging
VLBI	Very Long Baseline Interferometry
ESA	European Space Agency
GAIA	Global Astrometric Interferometer for Astrophysics
DSA	Deep Space Antenna
RDEF	Raw Data Exchange Format
MONTE	Mission analysis, Operations, and Navigation Toolkit Environment
NASA	National Aeronautics and Space Administration
RTLTL	Round Trip Light Time
SNR	Signal-to-noise ratio
PLL	Phase Locked Loop
VCO	Voltage Controlled Oscillator
MASER	Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation
USO	Ultra-Stable Oscillator
FTS	Frequency and Timing Subsystem
DSN	Deep Space Network
QUASAR	QUASi-stellar radio source
W Δ -DOR	Wideband Delta-Differential One-way Ranging
QS	Quasar
SC	Spacecraft
UTC	Universal Time Coordinated
ESTRACK	European Space TRACKing
ESOC	European Space Operations Centre
TC	Telemetria e Comando
PN	Pseudorandom Noise
LDC	L-band Down Converter
IFMS	Intermediate Frequency Modem System
FD	Flight Dynamics
DSP	Digital Signal Processor
DST	Deep Space Transponder
RRC	Root Raised-Cosine
NRZ	Non-Return-To-Zero
PNGEN	Pseudo Noise GENerator
LFSR	Linear Feedback Shift Registers
RRCF	Root Raised Cosine-shaping Filter
CIC	Comb-Interpolation-Cascaded filter

NCO	Numeric Controlled Oscillator
CORDIC	COordinate Rotation DIgital Computer
EVN	European VLBI Network
ECG	ExtraGalactic radio sources
NRAO	National Radio Astronomy Observatory
VLBA	Very Long Baseline Array
KVN	Korean VLBI Network
ITRF	International Terrestrial Reference Frame
RCP	Right-hand Circular Polarization
LCP	Left-hand Circular Polarization
NAIF	Navigation and Ancillary Information Facility
DOY	Day Of Year
FWHM	Full Width at Half Maximum
ASCII	American Standard Code for Information Interchange
ID	IDentificativo
EDV	Extended Data Version
CCSDS	Consultative Committee for Space Data Systems
I	Campione in-fase di un segnale complesso
Q	Campione in quadratura di un segnale complesso
LSB	Least Significant Bit
MSB	Most Significant Bit
EME	Earth Mean Equator
LOS	Line Of Sight
ICRF	International Celestial Reference Frame
RA	Right Ascension
DEC	DEClination
JPL	Jet PropulsionLaboratory

Capitolo 1

Introduzione

In ambito spaziale, un campo in rapida espansione riguarda la ricerca di tecniche ottimizzate per effettuare il tracciamento di sonde in spazio profondo. Infatti, sia per effettuare correttamente la navigazione di satelliti, che per estrarre misure valide ai fini scientifici da corpi celesti sconosciuti, è necessario conoscere con adeguata accuratezza le effemeridi dei corpi considerati.

Attualmente, i metodi maggiormente in uso per il Deep Space Tracking sono basati su misure di tipo radiometrico, quali il Ranging, il Doppler ed il Delta-Differential One-way Ranging (Delta-DOR), spesso affiancate da osservabili ottiche o di altro genere. Le varie tecniche radiometriche sfruttano un differente numero di antenne ad alto guadagno per realizzare il tracciamento di una singola sonda, al fine di sopperire alla limitata potenza dei segnali ricevuti a terra, causata sia dalle perdite dovute all'attraversamento dei media, che dalle limitate potenze di trasmissione disponibili a bordo. In particolare, il Delta-DOR richiede la registrazione intervallata di segnali della sonda stessa e del segnale emesso da radiosorgenti, quali le quasar.

Nelle agenzie spaziali, il numero di antenne ad alto guadagno esistenti per il supporto di missioni in spazio profondo è estremamente limitato. L'incremento di missioni Deep Space verificatosi negli ultimi decenni ha fatto sì che la quantità di richieste di utilizzo delle antenne appartenenti alle reti considerate non fosse proporzionata alle disponibilità, con la conseguente mancanza di supporto ininterrotto alle missioni. Ciò ha comportato la necessità di compromessi sui tempi di osservazione applicabili per ogni target di missione, riducendo i periodi di tracciamento rispetto alle ore effettivamente dedicabili.

Questa carenza di copertura del segnale da parte delle stazioni di terra ha incoraggiato il sollevamento della seguente ipotesi: la possibilità di sfruttare antenne appartenenti ad altri enti per effettuare il tracciamento di sonde interplanetarie. Esistono, infatti, reti di antenne ad alto guadagno estese su larga scala, regolamentate da enti internazionali, che supportano missioni di esplorazione spaziale, contribuendo, inoltre, alla ricerca nell'ambito della radioastronomia. Fra queste vi sono le reti di antenne per interferometria radio,

utilizzate per effettuare la Very Large Baseline Interferometry (VLBI) per il Deep Space Tracking e, in particolare, nel caso di trasmissioni Delta-DOR. Questa tecnica permette di applicare le antenne per la sola ricezione dei segnali, trattandosi di un metodo di natura “one-way”.

Nel 2018 sono state realizzate misurazioni Delta-DOR della sonda Global Astrometric Interferometer for Astrophysics (GAIA) della European Space Agency (ESA), sfruttando antenne appartenenti al complesso di ricevitori dell’European Space Tracking (ESTRACK) network, coadiuvate da antenne VLBI, con risultati coerenti ad analisi di dati raccolti senza l’utilizzo di antenne VLBI [1].

Per esonerare la rete ESTRACK da eccessive richieste di puntamento, è stata analizzata la possibilità di ottenere osservabili radiometriche sfruttando unicamente ricevitori VLBI, in modo da incrementare il numero di antenne disponibili per il tracking di missioni Deep Space.

Questa tesi mira ad analizzare la fattibilità di Deep Space Tracking del satellite astrometrico GAIA di ESA, attraverso registrazioni Delta-DOR realizzate solamente tramite antenne VLBI prestabilite (in particolare, il ricevitore del radiotelescopio di Medicina e l’antenna ad alto guadagno di Noto, entrambi situati in Italia). È stato analizzato un intervallo di registrazione del segnale proveniente dalla sonda e da una quasar di riferimento, utilizzato come calibratore nel sistema di misurazioni Delta-DOR. Le misurazioni Delta-DOR, raccolte sotto forma di files registrati in formato VLBI Data Interchange Format (VDIF) sono stati convertiti in Raw Data Exchange Format (RDEF), per assicurare la compatibilità con il correlatore sviluppato da ESA, in grado di estrarre l’osservabile di interesse. Il risultato del correlatore, il quale adotta particolari accorgimenti per l’analisi del segnale, quali la correzione per lo shift Doppler e tecniche differenti in caso di segnale della sonda o segnale della quasar, è stato inserito in un setup sviluppato con il Mission analysis, Operations, and Navigation Toolkit Environment (MONTE), un’estensione di Python fornita da NASA per la determinazione orbitale. Nonostante la geometria sfavorevole delle posizioni delle antenne considerate, l’output di tale analisi mostra risultati compatibili con i valori attesi a partire dal modello dinamico, ponendo le prime conferme sulla fattibilità di utilizzare sole antenne VLBI per realizzare osservazioni Delta-DOR in caso di sonde interplanetarie.

1.1 Tecniche radiometriche per il Deep Space Tracking

Per la raccolta di informazioni riguardanti le effemeridi di una sonda Deep Space, vengono sfruttate diverse tecniche: Ranging, Doppler e Delta-DOR. Ciascuna di esse può essere impiegata per estrarre un'osservabile differente riguardante lo stato e la dinamica dello spacecraft [1].

1.1.1 Ranging

Con la tecnica di Ranging è possibile estrarre un'osservabile legata alla distanza tra lo spacecraft e la stazione ricevente, misurando il tempo impiegato da un segnale per spostarsi dal target al ricevitore. Viene principalmente sfruttata durante la fase di crociera della sonda, ma può essere utile anche in orbita intorno a un corpo celeste, per determinare le effemeridi di quest'ultimo. Questo metodo di rilevazione del target può raggiungere una precisione di 1 m, anche in caso di rapporti segnale/rumore (Signal-to-Noise Ratio, SNR) limitati [2].

Il Two-way Coherent Range rappresenta la tipologia di misurazione più utilizzata, poiché fornisce i risultati migliori in termini di accuratezza, e richiede la trasmissione sia da parte dello spacecraft, che della stazione.

Inizialmente, un segnale viene generato alla stazione trasmittente, la cui fase è registrata periodicamente, e modula in fase la portante in uplink. Una volta ricevuto dal trasponder della sonda, il segnale viene demodolato, estraendone così il segnale ranging in banda base. Quest'ultimo viene filtrato e amplificato, per poi essere modulato in fase sulla portante in downlink. Infine, il segnale è demodolato e registrato alla stazione ricevente, dove è possibile estrarre il Round Trip Light Time (RTLT), ovvero il tempo impiegato dal segnale, una volta trasmesso, per viaggiare fino alla sonda e, in seguito, raggiungere la stazione ricevente. Il RTLT è ottenuto attraverso una misurazione di fase attuata alla stazione ricevente e a quella trasmittente.

Il transponder della sonda sfrutta una tecnica che garantisce la corretta relazione tra le portanti in ricezione e trasmissione: viene agganciata la fase ricevuta dallo spacecraft e inviata nuovamente a terra, perciò, il segnale viene detto *phase-locked*. Il Phase Locked Loop (PLL) è costituito da un circuito di retroazione che presenta un oscillatore controllato in tensione (Voltage Controlled Oscillator, VCO), in grado di correggere costantemente la frequenza di un segnale in input; si tratta di un'architettura principalmente sfruttata nel campo delle applicazioni in radiofrequenza. La struttura è dotata di un rilevatore di fase che confronta la fase del segnale considerato con quella di un segnale di riferimento (nel nostro caso, i due segnali sono rappresentati dalla carrier in downlink e in uplink) e genera tensione correlata alla differenza di fase. Il VCO sviluppa un segnale sinusoidale, la cui frequenza corrisponde alla frequenza centrale fornita da un filtro passa-basso [3].

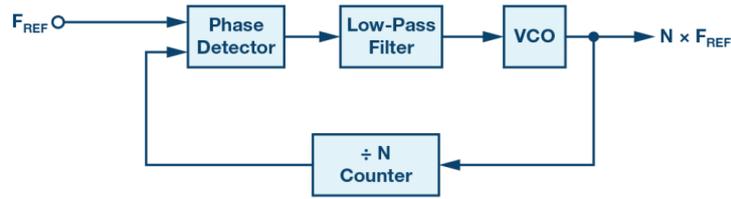


Figura 1.1: Funzionamento di un Phase Locked Loop. [3]

La tecnica two-way ranging viene detta coerente, poiché è in grado di garantire una corretta relazione tra le portanti in trasmissione e ricezione alla stazione di terra tramite il PLL. Nella modalità two-way, inoltre, è possibile affidarsi alla elevata stabilità degli oscillatori presenti nelle radiostazioni, che risultano largamente più performanti rispetto a quelli presenti a bordo delle sonde. Solitamente, vengono impiegati Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation (maser) a idrogeno.

Tali maser operano alla frequenza di risonanza dell'atomo di idrogeno, e il loro funzionamento presuppone l'invio di idrogeno gassoso attraverso una porta magnetica, che permette il passaggio di atomi con un preciso stato energetico. Gli atomi che attraversano il passaggio entrano in un involucro di stoccaggio circondato da una cavità risonante intonata. Una volta dentro l'involucro, alcuni atomi riducono il proprio livello energetico, liberando fotoni nella frequenza delle microonde. Questi fotoni stimolano gli atomi adiacenti a scendere di livello energetico, in modo da rilasciare ulteriori fotoni. Così, viene creato un campo di microonde autoalimentato nell'involucro. La cavità intonata intorno a tale contenitore permette di direzionare nuovamente i fotoni all'interno del sistema, per mantenere l'oscillazione attiva. Il risultato è un segnale microonde ad emissione continua, impostato sulla frequenza di risonanza dell'atomo di idrogeno, attivo fintanto che nuovi atomi sono introdotti all'interno del sistema. Questo segnale viene utilizzato per mantenere un oscillatore a cristalli di quarzo sincronizzato sulla frequenza dell'idrogeno.

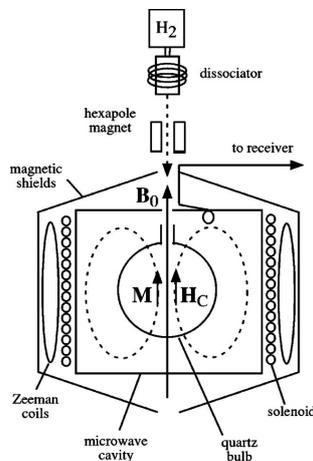


Figura 1.2: Schema di funzionamento di un maser a idrogeno. [4]

In una misurazione two-way con maser a idrogeno nelle stazioni di terra, un orologio registra l'istante di tempo della partenza del segnale ranging e il corrispettivo valore al ritorno del segnale alla stessa stazione, evitando così problemi legati alla sincronizzazione con l'orologio di bordo dello spacecraft.

Oltre al Two-way Coherent Range, esiste anche la modalità di ranging one-way (con una singola stazione di terra con la sola funzione di ricevitore, mentre il segnale è inviato dallo spacecraft) e quella three-way (simile al two-way ranging, ma con due diverse stazioni adibite a svolgere le funzioni di ricevitore e trasmettitore).

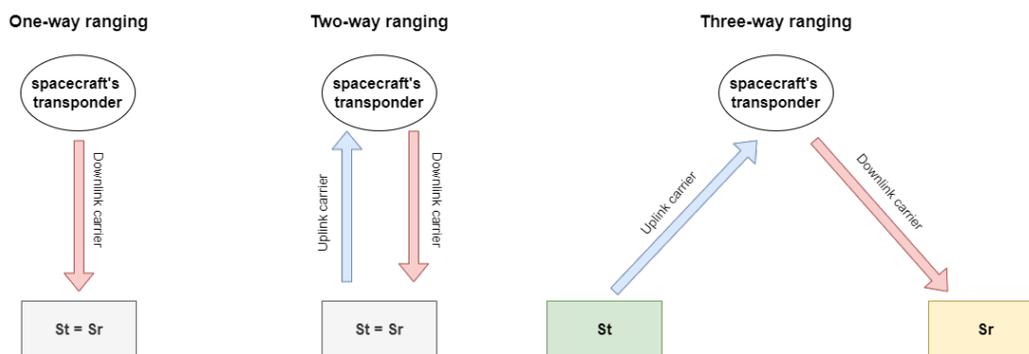


Figura 1.3: Schematizzazione del funzionamento della tecnica di Ranging (One-way, Two-way, Three-way).

1.1.2 Doppler

L'osservabile Doppler fornisce informazioni riguardanti la velocità relativa lungo la linea di vista tra la sonda Deep Space e la stazione ricevente. Si tratta di una tecnica attualmente sfruttata nell'ambito del Deep Space Tracking; è realizzata misurando la differenza in frequenza del segnale sinusoidale che raggiunge il ricevitore, rispetto alla frequenza di riferimento inviata dallo spacecraft. Ha un impatto elevato durante la fase di crociera e di orbita intorno a un corpo celeste. Riveste, inoltre, un ruolo fondamentale nelle applicazioni di radio scienza; in particolare, questa tecnica ha reso possibile l'analisi della composizione di atmosfere e strutture interne di pianeti e svariati altri corpi celesti [5], [6], [7], [8].

Il metodo di misurazione si basa sull'effetto Doppler: il trasmettitore e il ricevitore sono in moto relativo tra loro e tale condizione causa una differenza in frequenza tra la portante ricevuta e quella effettivamente trasmessa. Questo shift in frequenza deriva dalla velocità relativa lungo la linea di vista, che si ricava sommando geometricamente le velocità del trasmettitore e del ricevitore in un dato sistema di riferimento. Nel caso di reti di antenne a terra, in qualità di radiostazioni, una misurazione Doppler consiste nella raccolta di un insieme di dati riguardanti la fase della portante. Esistono tre categorie differenti di

rilevazione Doppler, analogamente al Ranging: one-way, two-way e three-way e in tutti i casi viene registrata la fase della portante in downlink.

Attraverso il primo metodo, il One-way Doppler, la sonda invia a terra una portante in downlink di frequenza conosciuta, di cui viene determinato lo shift Doppler, una volta che questa ha raggiunto la stazione. Il fattore limitante che caratterizza questa tipologia di misurazione è dovuto alla stabilità di frequenza dell'oscillatore a bordo dello spacecraft, utilizzato per generare la portante in downlink. Tipicamente a bordo vengono impiegati degli Ultra-Stable Oscillators (USO) per migliorare la qualità delle osservabili Doppler, dispositivi che operano ad elevate escursioni termiche e, pertanto, dotati di sistemi di termoregolazione ottimizzati. Gli USO sono solitamente realizzati in quarzo o rubidio, ma la ricerca di un materiale ottimale per la realizzazione di tali oscillatori è tuttora aperta [9].

Una misurazione Two-way Doppler, invece, coinvolge una stazione di terra sia in trasmissione che in ricezione, la stessa per i due casi. La portante in uplink viene tracciata dal transponder dello spacecraft; tra la sua frequenza e quella trasmessa in partenza alla stazione, esiste uno shift Doppler proporzionale alla velocità relativa tra antenna di terra e target. Nello spacecraft, viene prodotta una portante in downlink coerente con quella ricevuta in uplink, la cui frequenza è moltiplicata per una costante, detta rapporto di transponding (Transponding Ratio). La downlink carrier in arrivo alla stazione di terra differisce, quindi, da quella in uplink, sia per l'effetto Doppler, che per il rapporto di transponding, introdotto dalla strumentazione di bordo. Nelle categorie di misurazione Doppler, la tipologia Two-way è la più precisa, di conseguenza, quando esiste questa possibilità, è preferibile impiegarla.

La misurazione Three-way Doppler si differenzia da quella Two-way a causa del fatto che la ricezione della downlink carrier avviene da parte di una stazione di terra diversa da quella che ha trasmesso il segnale in uplink. In un'applicazione di questa tipologia esistono quindi tre nodi: stazione trasmittente, spacecraft e stazione ricevente. Sia nella tecnica three-way che in quella two-way, la portante di riferimento è generata nella stazione di terra. La frequenza della portante in uplink viene sintetizzata in una frequenza di riferimento altamente stabile, fornita dal Frequency and Timing Subsystem (FTS), cioè, un apparato comprendente orologi, calibratori di fase ed equipaggiamento per la distribuzione relativa a tempo e frequenza. Il FTS è posizionato a terra e può essere allocato in un'apposita camera separata oppure installato all'interno dell'antenna stessa. Questo sistema garantisce una portante di riferimento tipicamente più stabile in termini di varianza di Allan rispetto all'oscillatore posto a bordo dello spacecraft, di conseguenza, l'accuratezza delle misurazioni Doppler di tipo two-way e three-way risulta maggiore di quella del One-way Doppler.

Applicazioni scientifiche di misurazioni Doppler

Le misurazioni Doppler sono state applicate in esperimenti sulla conferma della teoria della Relatività Generale, attraverso la sonda Cassini e altre missioni interplanetarie: la Relatività Generale prevede che il ritardo subito da segnali luminosi, che viaggiano dalla Terra verso un altro pianeta, comprenda un contributo ulteriore, dovuto all'effetto diretto della gravità solare sullo spaziotempo. Attraverso esperimenti precedenti, sono state confermate le predizioni della teoria di Einstein riguardo alla deviazione di traiettoria e al ritardo di arrivo a un rilevatore, subiti da fotoni emessi dal Sole, con un'accuratezza dello 0.1% [10], [11].

La sonda Cassini ha contribuito alla misurazione Doppler dello shift in frequenza dei fotoni radio, appoggiandosi alla Deep Space Station di Goldstone, appartenente alla rete NASA del Deep Space Network (DSN). Tale rete consiste in tre complessi caratterizzati da riflettori parabolici, manovrabili, ad alto guadagno [12], e svolge attività di supporto alle missioni interplanetarie e di esplorazione spaziale. Sono distanziati approssimativamente 120° di longitudine l'uno dall'altro sulla superficie della Terra: il Goldstone Deep Space Communications Complex, nel deserto del Mojave in California, il Madrid Deep Space Communications Complex, 60 km ad Ovest di Madrid in Spagna, e il Canberra Deep Space Communications Complex, 40 km a Sud-Ovest di Canberra in Australia.

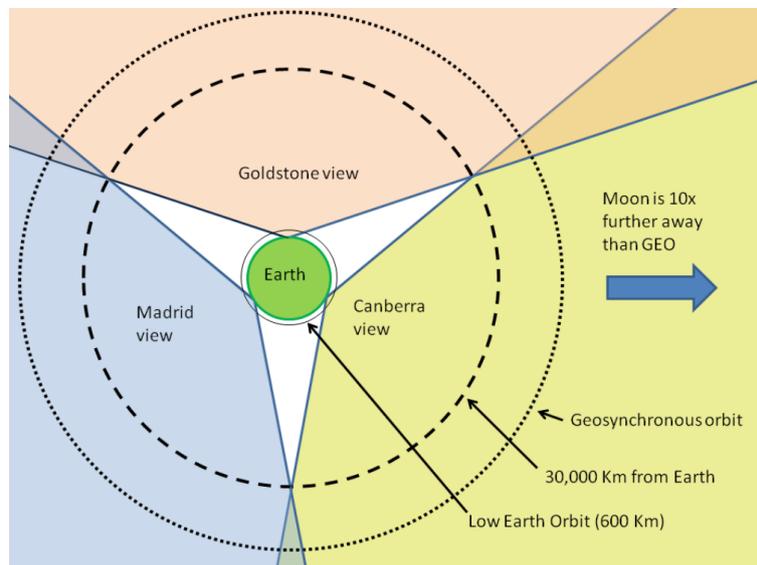


Figura 1.4: Vista dal polo Nord terrestre, rappresentazione del campo di acquisizione delle principali antenne del DSN. Quando una missione raggiunge più di 30 000 km di distanza dalla Terra, risulta sempre visibile da almeno una delle stazioni. [13]

La misurazione dello shift Doppler di onde radio operata da Cassini ha portato ad un risultato coerente con le predizioni della Relatività Generale. L'esito dell'esperimento è caratterizzato da una sensibilità che si avvicina a un livello tale per cui le deviazioni riscontrate sono previste in alcuni modelli cosmologici. Pertanto, la tecnica di rilevazione

Doppler ha apportato significativi contributi anche a ricerche scientifiche non finalizzate al solo Deep Space Tracking [14].

1.1.3 Delta-DOR

Il Delta-DOR è una tecnica interferometrica in grado di restituire la posizione angolare di una sonda nel cielo, con maggior accuratezza rispetto a quanto ottenibile indirettamente attraverso le tecniche di Ranging e Doppler. Il Delta-DOR è applicato per la navigazione della sonda in fase di crociera e per il miglioramento delle effemeridi del corpo celeste centrale, quando lo spacecraft si trova in orbita.

Attraverso il Delta-DOR è misurata la differenza nel tempo impiegato dal segnale emesso da una sonda per raggiungere due o più stazioni di terra ad alto guadagno. Da questo divario temporale viene ricavato un valore di distanza spaziale $\Delta\rho$, calcolato moltiplicando il ritardo τ per la velocità della luce c :

$$\Delta\rho = c \cdot \tau = c \cdot (t_2 - t_1) \quad (1.1)$$

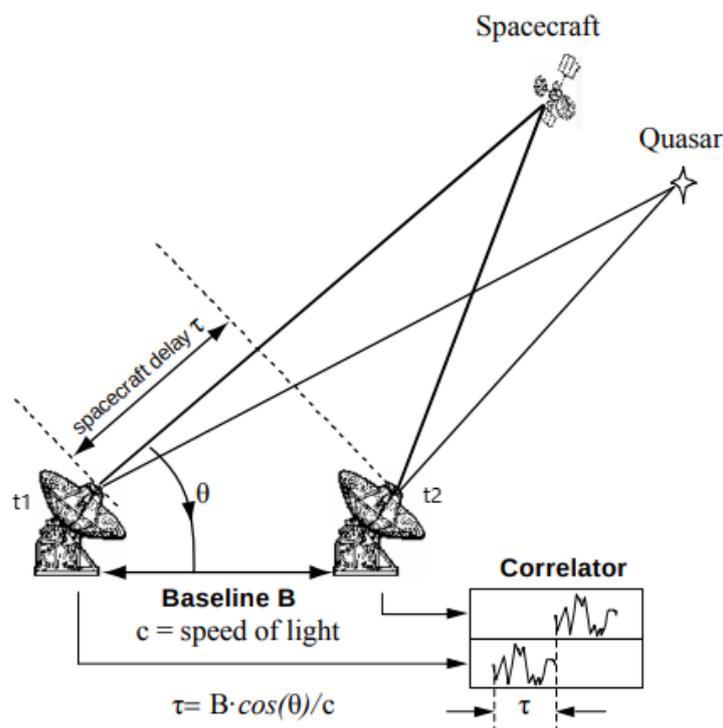


Figura 1.5: Rappresentazione del ritardo temporale misurato in un'applicazione Delta-DOR. [15]

Dall'utilizzo di questa differenza di tempi deriva il nome Differential Ranging. In aggiunta, le stazioni di terra sono posizionate ad elevata distanza reciproca al fine di migliorare l'accuratezza geometrica: infatti, più elevata è la distanza tra le stazioni riceventi (detta

baseline), maggiore è l'accuratezza dell'osservabile, per cui vengono solitamente utilizzate *baselines* dell'ordine di 10^4 km.

Per perfezionare la qualità delle osservabili generate dal Delta-DOR, vengono sfruttati segnali delle quasars come calibratori, stimando così l'errore sulle misure della quasar e riportandolo su quelle dello spacecraft. Una quasar è un nucleo galattico attivo estremamente luminoso, di cui è possibile ottenere misure di direzione estremamente accurate: si ha un errore dell'ordine di 1 nrad nel caso di Wideband Delta-DOR e di 10-15 nrad per il Narrowband Delta-DOR [16]. In prima approssimazione, ai fini della correzione del segnale dello spacecraft per mezzo delle misure quasar, si può considerare il segnale in downlink dello spacecraft come trasmesso dalla stessa posizione della quasar; questa ipotesi può essere considerata valida se la distanza angolare fra quasar e sonda è al di sotto di un certo valore di soglia. L'introduzione delle quasars come radiosorgenti extragalattiche, dunque, fornisce un fattore correttivo alle misure della sonda (il Delta nell'acronimo), permettendo di ottenere un'accuratezza di misura elevata, dell'ordine di pochi mas.

La quantità direttamente osservabile in una misurazione DOR è costituita dal tempo di ritardo dell'arrivo del medesimo segnale ai vari ricevitori di terra. Tale tempo di ritardo è direttamente legato a un valore di distanza spaziale (come mostrato in eq.1.1) e consente di individuare la posizione angolare dello spacecraft rispetto alla *baseline*. Attraverso il ritardo, si determina l'angolo θ tra il vettore *baseline* \vec{B} (che collega il ricevitore 1 al ricevitore 2) e la direzione della sorgente radio \vec{s} . La geometria è mostrata in figura 1.6. Il ritardo τ è dato approssimativamente dall'equazione:

$$\tau \approx -\frac{1}{c}\vec{B} \cdot \vec{s} = -\frac{1}{c}\vec{B} \cdot \cos \theta \quad (1.2)$$

Per cui, la posizione angolare dello spacecraft viene calcolata come segue:

$$\theta = \arccos \frac{c\tau}{B} \quad (1.3)$$

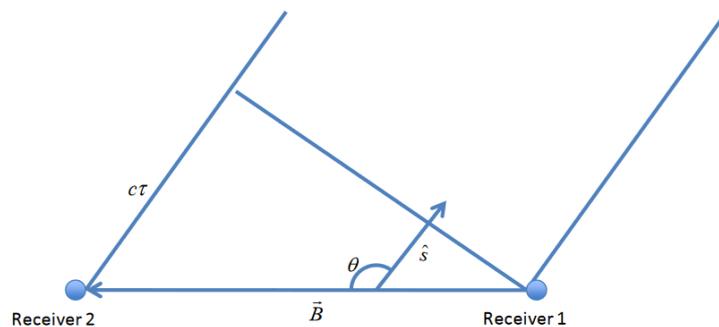


Figura 1.6: Geometria di una misurazione DOR senza calibrazione tramite quasar. [15]

Le ampie distanze operative comportano un'elevata difficoltà nel mantenimento di calibrizioni a livello del sistema: per questa ragione, nel Delta-DOR viene applicata la calibrizione tramite il segnale quasar. La geometria in figura 1.7 è la stessa della figura 1.6, ma si aggiunge la conoscenza della direzione della sorgente radio costituita dalla quasar, \hat{s}_2 , a quella della direzione dello spacecraft rispetto alle stazioni di terra, \hat{s}_1 . Il ritardo differenziale tra la sorgente 1 e la sorgente 2 è dato approssimativamente da:

$$\Delta\tau = \tau_1 - \tau_2 \approx -\frac{1}{c}B(\hat{s}_1 - \hat{s}_2) \approx -\frac{1}{c}B \sin \theta_1 (\theta_1 - \theta_2) \approx -\frac{1}{c}B \sin \theta_1 (\Delta\theta_B) \quad (1.4)$$

dove $\Delta\theta_B = \theta_1 - \theta_2$ è la componente della separazione angolare tra le due radiosorgenti in direzione della *baseline*.

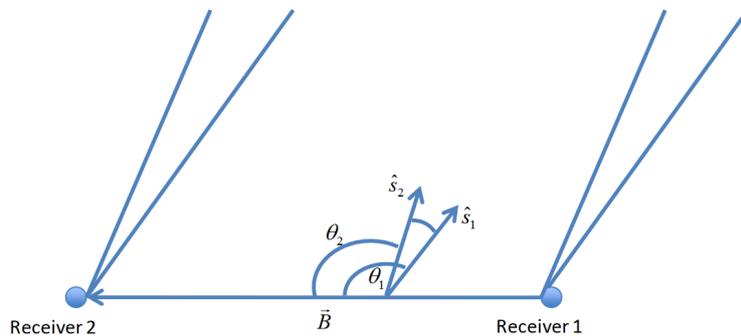


Figura 1.7: Geometria di una misurazione DOR con calibrazione tramite quasar. [15]

La separazione angolare totale tra le due sorgenti (quasar – QS, spacecraft – SC) è denotata con $\Delta\theta$. L'accuratezza della determinazione di $\Delta\theta_B$ dalla eq.1.4 aumenta al diminuire dell'errore di misurazione nell'osservabile $\Delta\tau$. Inoltre, l'accuratezza di $\Delta\theta_B$ aumenta all'aumentare della *baseline*.

Tenendo conto di questa e altre relazioni di proporzionalità tra i parametri che caratterizzano il Delta-DOR, si può ricavare l'accuratezza della determinazione dell'offset angolare $\sigma_{\Delta\theta_B}$ in funzione dei valori fondamentali:

$$\sigma_{\Delta\theta_B} \propto \frac{\Delta\theta}{f_{BW}B} \quad (1.5)$$

in cui f_{BW} rappresenta la larghezza di banda acquisita dai ricevitori.

La sonda è in grado di inviare un segnale arbitrario, pertanto, al fine di estrarre l'osservabile DOR sono scelti dei semplici segnali sinusoidali, detti toni DOR, che vengono generati dal transponder di bordo e la cui frequenza viene modificata in base a una portante di riferimento. In termini di potenza trasmessa, essi risultano maggiormente efficienti rispetto a un tipico segnale quasar, contraddistinto da rumore bianco.

Durante un'osservazione Delta-DOR, i canali dello spettro in radiofrequenza sono registrati e centrati sulle frequenze ricevute dei toni dello spacecraft. La frequenza di cam-

pionamento deve essere abbastanza alta da ridurre ad un livello accettabile gli errori introdotti dal rumore termico.

Attraverso una correlazione incrociata (Cross Correlation), il segnale della quasar viene analizzato in entrambe le stazioni, mentre, nel caso dello spacecraft, è applicata una tecnica relativa all'estrazione della fase dei toni DOR. Nonostante i metodi differiscano tra loro, il risultato del processo è caratterizzato dallo stesso ritardo temporale per entrambi i casi. Il moto relativo tra i corpi, tuttavia, produce uno shift Doppler del segnale diverso per ogni stazione di terra, che deve essere compensato per ottenere una corretta estrazione delle osservabili.

Al termine dell'analisi, risulta possibile ricavare l'errore nel ritardo temporale atteso, dalle registrazioni del segnale quasar. In seguito, questo errore è utilizzato per calibrare l'osservabile ottenuta dallo spacecraft. Il confronto tra la posizione della sonda, trovata analizzando i dati registrati dalle antenne, e la stessa posizione calcolata con un modello matematico a partire da condizioni iniziali note, restituisce la correzione dei valori stimati delle osservabili.

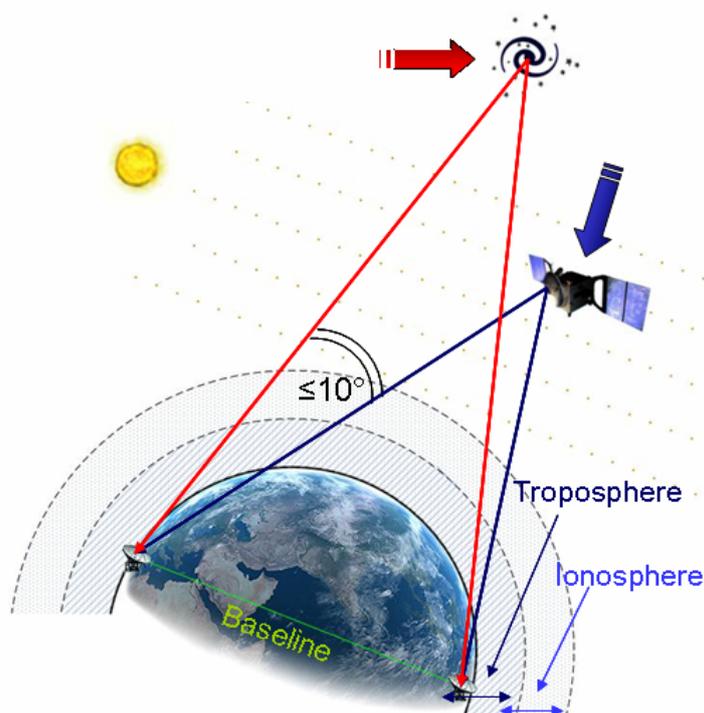


Figura 1.8: Rappresentazione di una classica misurazione Delta-DOR. [17]

Normalmente una registrazione Delta-DOR è composta da tre o più scansioni dei dati, ciascuno di questi con una durata di pochi minuti. Una scansione è realizzata puntando le antenne verso una singola radiosorgente e registrando il segnale in ricezione. L'antenna deve essere direzionata verso l'altra radiosorgente per la scansione successiva e così via. La sequenza di osservazione può essere SC-QS-SC, QS-SC-QS o una sequenza più lunga di osservazioni alternate, in base alle caratteristiche delle sorgenti e agli obiettivi della

sessione di misurazione. Per eliminare offset temporali e calcolare la posizione angolare della sonda, è necessaria una sequenza di almeno tre scansioni. Una volta registrati, i segnali ricevuti vengono raccolti in un sito comune e quindi correlati fra loro [15].

Data la natura dei segnali, la registrazione dei toni DOR può cominciare in qualunque momento, senza influire sui risultati finali (escluso il tempo di registrazione totale) e può protrarsi per un intervallo temporale arbitrario. Le osservazioni Delta-DOR richiedono l'utilizzo di almeno due antenne ad alto guadagno a terra; le antenne vengono solitamente impiegate per non più di due ore, fungendo solamente da ricevitori in modalità one-way. Inoltre, data la posizione delle stazioni di terra, lo spacecraft e la quasar sono visti sorgere da una stazione e tramontare dall'altra, mantenendo una bassa elevazione sull'orizzonte; ciò comporta una scarsa flessibilità per quanto concerne la pianificazione delle registrazioni e rende necessaria la ricerca di soluzioni alternative per la scelta delle stazioni di terra. Queste alternative devono soddisfare i requisiti di raccolta dati richiesti per le osservazioni Delta-DOR e rispettare le seguenti condizioni:

- I segnali di spacecraft e quasar devono essere acquisiti nella gamma di frequenze prevista in modalità *open loop*, rispettando le limitazioni prestabilite per la minima frequenza di campionamento e la risoluzione in bit dei campioni acquisiti.
- Il rapporto segnale/rumore deve essere sufficientemente elevato per permettere la ricezione dei deboli segnali interessati. Questo requisito si traduce nell'impiego di antenne dai grandi diametri con ricevitori raffreddati a temperature criogeniche per ridurre il rumore termico.
- È richiesta una stabilità piuttosto alta degli oscillatori a terra, con ogni orologio sincronizzato al tempo UTC (Universal Time Coordinated), cioè al fuso orario di riferimento. [18]

Attualmente, la rete internazionale adibita alle misurazioni Delta-DOR è costituita dal DSN, le cui antenne possiedono prevalentemente riflettori parabolici; in particolare, il complesso di Goldstone, in California, comprende cinque antenne paraboliche, la più grande di queste ha un diametro di 70 m (230 ft) e configurazione Cassegrain [19].

In Europa, il Deep Space Tracking è governato da ESA attraverso l'ESTRACK network, un sistema globale di stazioni di terra che collegano i satelliti in orbita, controllato dall'European Space Operations Centre (ESOC), il centro operativo situato a Darmstadt, in Germania [20]. Tale rete è composta da tre antenne paraboliche di 35 m di diametro, largamente distanziate in longitudine, allocate a Cebreros (Spagna), New Norcia (Australia) e Malargüe (Argentina). Le antenne effettuano trasmissione e ricezione principalmente in banda X (7-12 GHz) e banda Ka (27-40 GHz), con alcune aggiunte in banda S (2-4 GHz) e banda K (18-27 GHz). Il sistema di comunicazione in radio frequenza sfrutta la

tipologia di antenne a guida d'onda Cassegrain, operanti tramite specchi diecrici sensibili a tali frequenze, feed in banda X e Ka e amplificatori a basso rumore raffreddati ad elio [21]. L'ampio utilizzo delle Deep Space Antennas (DSA) della rete ESTRACK vincola significativamente la pianificazione delle registrazioni Delta-DOR, per cui la ricerca di soluzioni alternative per la realizzazione del tracking attraverso questa tecnica radiometrica ha portato alla proposta dell'applicazione di antenne VLBI per l'osservazione Delta-DOR.

Wideband Delta-DOR

Durante il tracking di una sonda Deep Space, il segnale emesso dallo spacecraft può essere disturbato da svariate sorgenti di rumore. Negli anni passati, l'Agenzia Spaziale Europea (ESA) ha sviluppato missioni basate sul *Narrowband* Delta-DOR, ossia il Differential One-Way Ranging esteso su una banda di frequenze ristretta, privo di un generatore di toni DOR dedicato all'interno del transponder della sonda. Questa tipologia di tracking è affetta da errori dovuti alla calibrazione del mezzo di propagazione non ideale, al rumore termico che influenza il segnale della quasar e dello spacecraft e, infine, alle non linearità di fase nella larghezza di banda di registrazione. L'accuratezza delle misurazioni si stabilisce tra i 10 e i 15 nrad nell'ellisse di incertezza.

Recentemente, è stata studiata una nuova versione della tecnica Delta-DOR che incrementa l'efficacia delle rilevazioni, rendendo possibile una precisione di 1 nrad: il Wideband Delta-DOR ($W\Delta$ -DOR) [16]. Attraverso il $W\Delta$ -DOR vengono mitigati i contributi dell'ondulazione di fase e dell'errore dovuto a rumore termico: nella banda di osservazione, i segnali dello spacecraft sono resi simili al segnale quasar, ottenendo un inferiore bilancio di errore e aggirando le limitazioni della strumentazione posta nelle stazioni di terra. Inoltre, il livello di calibrazione può essere controllato attraverso parametri addizionali, quali la forma della larghezza di banda e le sue porzioni coperte dai ricevitori. La natura del segnale quasar, simile a un rumore, rende necessaria una acquisizione in modalità *wideband* nella maggioranza delle rilevazioni Delta-DOR; il segnale spacecraft è solitamente ricevuto in *narrowband*, essendo costituito da toni DOR e non da rumore bianco. Con il $W\Delta$ -DOR si può raggiungere una cancellazione quasi totale dell'imprecisione dovuta a oscillazione di fase, cambiando i toni DOR dello spacecraft in un segnale a spettro esteso. Ciò significa che la stessa configurazione *wideband* viene applicata per le misurazioni DOR, sia della quasar che della sonda, e ogni variazione di ritardo totale influenza le due sorgenti allo stesso modo, cancellandosi però nella misurazione Delta-DOR finale [22]. Il segnale in downlink utilizzato nel $W\Delta$ -DOR è presentato nella seguente equazione [16]:

$$S_{dl} = A \sin[2\pi f_c t + TC(t) + s_{W\Delta DOR}(t)] \quad (1.6)$$

Tale relazione è ottenuta attraverso la modulazione di fase di una portante in banda X o Ka per mezzo di componenti simili al rumore. A rappresenta l'ampiezza, f_c la frequenza della portante, $TC(t)$ il segnale di Telemetria e Comando, mentre $s_{W\Delta DOR}(t)$ indica le componenti dello spettro esteso che caratterizza il $W\Delta$ -DOR. Questo segnale è dato dalla somma di svariate sotto-portanti (subcarriers) alle frequenze f_i , modulate tramite rumori pseudo-random PN_i di ampiezza ϕ_i . Ciascuno di questi ultimi è generato attraverso sequenze pseudo-random [23].

$$s_{W\Delta DOR}(t) = \sum_{i=1}^N \phi_i PN_i \sin(2\pi f_i t) \quad (1.7)$$

I segnali dedicati nel $W\Delta$ -DOR vengono sfruttati, attraverso gli PN_i , per ridurre le differenze di dispersione di fase di quasar e spacecraft nella sezione in downlink. Questo assicura una migliore calibrazione dell'oscillazione di fase, che rende possibile l'elevata accuratezza del metodo. Il livello della calibrazione valutato dipende dalla larghezza di banda del canale dello spacecraft, impostata dal chip rate dello Pseudorandom Noise (PN), dalla porzione della banda registrata e dall'attenuazione del segnale, ripartito nei vari canali.

In ogni misura interferometrica, la larghezza di banda totale coperta Δf determina l'accuratezza del ritardo temporale calcolato σ_τ . Per lo spacecraft, l'espressione dell'errore del ritardo è data da:

$$\sigma_\tau = \frac{1}{2\pi\Delta f} \sqrt{\frac{2}{\frac{P}{N_0}T}} \quad (1.8)$$

equazione riferita allo spacecraft fornisce anche quella corrispondente alla quasar. Sfortunatamente, la possibilità di espandere la larghezza di banda rilevata è limitata dall'hardware presente nelle stazioni di terra. La larghezza di banda totale ottenibile tramite la strumentazione ESA è connessa alla capacità di precisione del L-band Down-Converter (LDC), il quale, secondo i dati del 2012, è in grado di estrarre una porzione di spettro larga 28 MHz. Sfruttando più di un LDC, è possibile acquisire differenti porzioni dello spettro del segnale. Ogni porzione può essere poi indirizzata a molteplici ricevitori di back-end (Intermediate Frequency Modem System, IFMS), espandendo la larghezza di banda totale a 220 MHz in banda Ka. Tuttavia, l'utilizzo di hardware diversi per differenti canali introduce fasi incognite, pertanto è necessario l'utilizzo di un metodo di sottrazione di fase per risolvere questa problematica. La fase del segnale di SC e QS per l' i -esimo canale a un istante di tempo generico t si può scrivere come la somma di quattro termini di fase:

$$\phi_{SIG_{A,B}}^{iSQ} = \phi_{0_{A,B}}^{iSQ} + 2\pi f_{LO}^i (t - t_0)_{A,B}^{S,Q} + \phi_{CLK}^i + \phi_\tau^{iS,Q} \quad (1.9)$$

- $\phi_{0A,B}^{iSQ}$ è la fase incognita del segnale quando l'oscillatore locale è reimpostato, al tempo t_0 . Può differire tra SC e QS, poiché generalmente gli oscillatori sono resettati tra due acquisizioni; differisce anche tra la stazione A e B.
- $2\pi f_{LO}^i (t - t_0)_{A,B}^{S,Q}$ è l'avanzamento di fase nell'intervallo dal tempo di reset al generico istante t .
- ϕ_{CLK}^i è l'offset temporale tra le stazioni di terra, assunto costante durante una sessione. Si tratta di un contributo differenziale tra le stazioni A e B.
- $\phi_{\tau}^{iS,Q}$ è la fase dovuta al tempo di ritardo dell'arrivo del segnale alle due stazioni; come l'offset temporale, è un contributo differenziale, ma varia nel tempo ed è diverso per SC e QS.

Poiché i tempi di reset e le frequenze degli oscillatori locali sono noti, il secondo termine di fase può essere facilmente rimosso. La conoscenza accurata delle dinamiche del segnale quasar permette di eliminarne completamente il ritardo geometrico. Per quanto riguarda lo spacecraft, è atteso un piccolo errore residuo, dovuto alle incertezze nelle predizioni orbitali, provenienti dalle stime fornite dal team di Flight Dynamics (FD). Una volta che è stato applicato il modello matematico per l'oscillatore locale e i contributi delle dinamiche del segnale, sono sottratte le fasi residue della stazione B a quelle della stazione A. La fase risultante si può esprimere in questo modo:

$$\Delta\phi^{iQ} = \Delta\phi_0^{iQ} + \phi_{CLK}^i \quad (1.10)$$

$$\Delta\phi^{iS} = \Delta\phi_0^{iS} + \phi_{CLK}^i + \Delta\phi_{\tau}^i \quad (1.11)$$

Dove $\Delta\phi^{iS}$ rappresenta la differenza tra la fase attuale e quella attesa dal modello. Il processo di correlazione assume che, nonostante le fasi iniziali incognite possano essere diverse tra SC e QS, esse coincidono per tutti i canali. La risoluzione dell'ambiguità consiste nella determinazione del ritardo temporale $\tau = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{d\phi}{df}$, per mezzo di una regressione lineare delle fasi $\Delta\phi$, e risulta indipendente dalle fasi iniziali. Nel caso della quasar, è possibile una risoluzione attraverso il termine di offset temporale incognito ϕ_{CLK}^i , che viene poi utilizzato nel correlatore dello spacecraft, per ottenere il DOR residuo. Nella configurazione *wideband*, l'offset temporale non può essere calcolato. Le fasi iniziali incognite $\Delta\phi_0^{iS,Q}$ non coincidono più attraverso i canali a causa dei seguenti fattori:

- L'utilizzo di multipli LDC
- La sincronizzazione UTC non uguale per i vari IFMS

- Ritardi differenti nei cavi utilizzati per indirizzare diverse porzioni dello spettro a diversi ricevitori

Le fasi finali conservano i contributi di quelle iniziali, oltre ai valori del ritardo temporale, senza possibilità di separazione dei due termini per sfruttare un approccio ulteriore. Assumendo che le fasi iniziali siano le stesse per le acquisizioni di SC e QS in ogni canale e considerando l'offset temporale costante durante l'acquisizione, la fase differenziale è libera dalle diverse fasi iniziali e può essere utilizzata per determinare il Delta-DOR. Il ritardo differenziale residuo può essere ottenuto tramite una regressione lineare delle fasi:

$$\Delta\phi^{iQ} - \Delta\phi^{iS} = \Delta\phi_{\tau}^i \quad (1.12)$$

Applicando il metodo di sottrazione di fase viene persa la capacità di ricavare l'offset temporale. Inoltre, esiste il vincolo operativo costituito dalla necessità di non resettare le fasi dell'oscillatore durante le acquisizioni di SC e QS. Alcune prove sperimentali hanno confermato che, quando le correlazioni standard e *wideband* sono messe a confronto, usando dati provenienti dalla stessa catena di conversione, le osservabili Delta-DOR sono coerenti [24].

Nel caso di ESA, l'effettiva applicazione del W Δ -DOR richiede una revisione dell'apparato hardware, con particolare importanza riservata al Digital Signal Processor (DSP), integrato nel modulo digitale del Deep Space Transponder (DST). L'architettura di un DSP si suddivide in due parti: Root Raised-Cosine (RRC) e Non-Return-to-Zero (NRZ). Segue una lista delle componenti fondamentali che le costituiscono:

- Rate Generator: il tasso di campionamento e il chip rate derivano dall'orologio principale. Il Rate Generator produce due segnali abilitati: il primo è utilizzato dallo Pseudo Noise Generator per controllare il chip rate in uscita, il secondo è sfruttato per sintonizzare il tasso di campionamento della sezione in uscita del filtro RRC e dell'ingresso del filtro Comb-Interpolation-Cascaded.
- Pseudo Noise Generator (PNGEN): due LFSR (Linear Feedback Shift Registers) generano la sequenza di PN.
- Root Raised Cosine Shaping Filter (RRCF): si tratta di un filtro che interpola e modella il codice PN in entrata.
- Comb-Interpolation-Cascaded Filter (CIC): l'output del filtro RRC necessita di un'ulteriore interpolazione poiché il chip rate è parametrico. Il filtro CIC offre svariati vantaggi, infatti la riconfigurazione del fattore di interpolazione è semplice rispetto ad altre tipologie di approccio, l'algoritmo non richiede moltiplicatori e viene fornita una risposta lineare in fase.

- Subcarrier Generator: il DSP deve generare due sotto-portanti (vengono sfruttati dei Numeric Controlled Oscillators, NCO), mentre la conversione da fase ad ampiezza è realizzata tramite un Coordinate Rotation Digital Computer (CORDIC) [25].

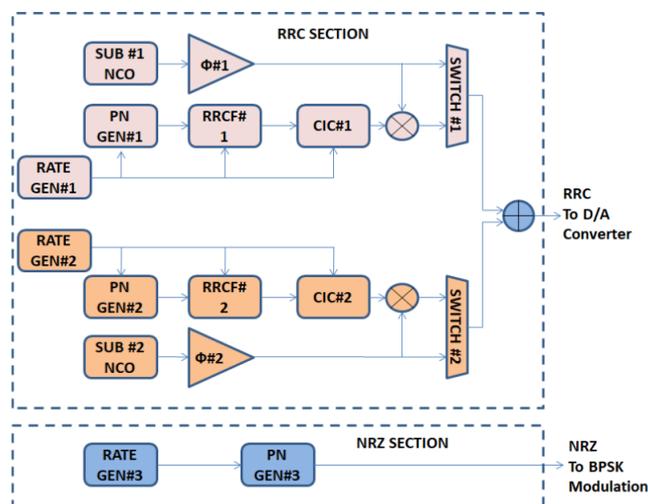


Figura 1.9: Architettura di un DSP progettato per il Wideband Delta-DOR. [25]

L'hardware realizzato appositamente per l'utilizzo del W Δ -DOR deve essere compatibile con il Narrowband Delta-DOR, in modo da assicurare un certo livello di intercambiabilità di componenti; dunque, sono necessarie verifiche sperimentali, una volta attuato il progetto. Il W Δ -DOR rappresenta una tecnologia all'avanguardia, tuttora in fase di sviluppo. La sua evoluzione può portare a un significativo aumento dell'accuratezza delle misurazioni Delta-DOR, dell'ordine di 1 nrad, necessaria per missioni Deep Space future che richiederanno un'elevata precisione nella conoscenza delle osservabili della sonda.

1.1.4 Antenne VLBI

In radioastronomia viene spesso utilizzata l'interferometria a lunghissima base o Very Long Baseline Interferometry (VLBI). In VLBI, un segnale è rilevato da più radiotelescopi, distanziati tra loro sulla superficie terrestre. Nota la distanza tra i telescopi e l'assetto della Terra, viene ottenuta la differenza temporale dell'arrivo del segnale, proveniente da una radiosorgente, alle varie stazioni. Questo consente di effettuare l'osservazione di un target attraverso multipli ricevitori, emulando così un unico telescopio di dimensione pari alla distanza massima tra le singole stazioni. I dati ricevuti da ogni dispositivo includono gli intervalli temporali necessari alla ricezione del segnale, sincronizzati con maser. Successivamente, i dati sono correlati con quelli provenienti dalle altre antenne, riguardanti lo stesso segnale radio, producendo il risultato finale. La risoluzione massima ottenibile tramite questa tecnica è proporzionale alla frequenza di osservazione [26].

Le antenne di tipo VLBI possiedono tutti i requisiti per registrare i dati utili alle osservazioni Delta-DOR. Come le antenne DSA, le stazioni VLBI sono equipaggiate con ricevitori in banda X, che possono raggiungere valori di larghezza di banda di 2 MHz nella registrazione e un valore di quantizzazione di 2 bit. Inoltre, sono provviste di orologi altamente stabili. Anche il rapporto segnale/rumore dei ricevitori VLBI è simile a quello delle antenne ESA ad alto guadagno.

La compatibilità di questa tipologia di antenne con la misurazione Delta-DOR ha spinto svariati enti scientifici a realizzare un numero significativo di esperimenti, in cui sono state affiancate antenne VLBI come supporto alle attività di navigazione di sonde Deep Space. Uno studio del 2019 ha provato che l'impiego di antenne VLBI appartenenti all'European VLBI Network (EVN) affiancate a un'antenna del DSA in una misurazione Delta-DOR produce risultati affidabili: è stato realizzato il Deep Space tracking in questa modalità alla sonda GAIA di ESA, ottenendo una corrispondenza positiva con le previsioni [1].

Il formato degli output di registrazione VLBI è VDIF, mentre le antenne di ESA restituiscono dati in formato RDEF; pertanto, è necessaria una conversione dei dati precedente all'analisi. Le stazioni VLBI scelte per portare avanti l'esperimento descritto in questo documento sono le seguenti:

- Stazione radioastronomica di Medicina (Italia, Emilia-Romagna): antenna parabolica di 32 m di diametro, lavora sulla banda di frequenze 1.4-23 GHz. [27]
- Radiotelescopio di Noto (Italia, Sardegna): antenna parabolica di 32 m di diametro, con superficie attiva costituita da 244 pannelli riflettenti mobili per compensare le deformazioni, lavora sulla banda di frequenze 0.327-43 GHz. [28]

Ciascuna stazione ha realizzato il puntamento della sonda GAIA di ESA durante intervalli temporali prestabiliti, prendendo come riferimento per la calibrazione delle misurazioni la quasar denominata P0507+17, caratterizzata da angoli di ascensione retta e declinazione pari a 77.510° e 18.011° , descritta in un catalogo di ExtraGalactic radio sources (ECG) del National Radio Astronomy Observatory (NRAO), il servizio statunitense per la ricerca in radioastronomia [29]. In seguito ad una fase di preprocessing ed analisi dati, questi sono poi stati analizzati tramite il correlatore ESA dedicato all'estrazione delle osservabili Delta-DOR.

Capitolo 2

Acquisizione dei dati

2.1 Preparazione di una schedula di registrazione

Le registrazioni dei segnali di spacecraft e quasar devono essere programmate con il necessario anticipo. Fra le varie informazioni richieste, è importante raccogliere quelle riguardanti la posizione delle stazioni di terra e la posizione e la visibilità delle sorgenti radio; in particolare, l'elevazione di queste sull'orizzonte, la quale influisce sia sul *path delay*, che sulla potenza del segnale in arrivo, a causa della maggiore quantità di atmosfera interposta tra target e ricevitore. Le antenne devono essere disponibili per il puntamento nell'intervallo di osservazione richiesto; inoltre, la posizione delle stazioni sulla terra (da cui è ricavata la *baseline*) costituisce un dato fondamentale per il calcolo del ritardo di arrivo del segnale.

Le coordinate dei ricevitori sulla Terra e le bande di frequenza da essi registrabili possono essere estratte da opportuni database. Per il caso in questione, è stato utilizzato il wrapper di Python apposto per la pianificazione di registrazioni VLBI, relativo al programma SCHED. SCHED è impiegato nella programmazione del puntamento di svariate reti di stazioni di terra, quali European VLBI Network (EVN), Very Long Baseline Array (VLBA) o Korean VLBI Network (KVN). Anche NRAO si serve di SCHED per la gestione dei numerosi radiotelescopi distribuiti sulla superficie terrestre. Esso può essere utilizzato per generare i files di controllo dell'hardware di stazione, a partire dalle schede di registrazione, opportunamente compilate dall'utente. I files di controllo hardware contengono le informazioni dettagliate riguardanti la movimentazione delle antenne e la configurazione da imporre ai ricevitori. Attraverso SCHED è inoltre possibile creare schedule fittizie per determinare la visibilità di una sorgente rispetto alle varie stazioni e stimare il tempo di osservazione totale richiesto per il progetto [30].

Due files appartenenti al database disponibile in SCHED sono stati utilizzati per l'estrazione delle informazioni riguardanti le stazioni. Il primo, *locations.dat* contiene i valori di interesse dati da:

- Nome della stazione
- Coordinate cartesiane della posizione del ricevitore, nel sistema di riferimento terrestre ITRF2014; si tratta di una terna di assi rotanti con la Terra. Se rappresentato con coordinate cartesiane, ha origine al centro della Terra, asse x nel piano equatoriale, positivo verso l'intersezione con il primo meridiano, asse y nel piano equatoriale (0°N, 90°E), asse z parallelo all'asse di rotazione terrestre medio, positivo verso il polo Nord [31].
- Velocità di deriva in coordinate cartesiane della stazione sulla superficie terrestre nello stesso sistema di riferimento relativo alla posizione (esprese in m/anno).
- Epoca di riferimento relativa alle coordinate fornite.

Tabella 2.1: Esempio di dati di stazione contenuti nel file SCHED, *locations.dat*

DBNAME = MEDICINA		
X = 4461369.5682 [m]	Y = 919597.2489 [m]	Z = 4449559.4702 [m]
$\frac{DX}{DT} = -0.01860 [\frac{m}{y}]$	$\frac{DY}{DT} = 0.01875 [\frac{m}{y}]$	$\frac{DZ}{DT} = 0.01200 [\frac{m}{y}]$
EPOCH = 58849		

Il secondo file, *freq.dat* presenta le seguenti informazioni utili:

- Codice assegnato al ricevitore di stazione
- Nome della stazione
- Banda di frequenze disponibili in polarizzazione di tipo Right-hand Circular Polarization (RCP) o Left-hand Circular Polarization (LCP), in base alla disponibilità hardware. È necessario prestare particolare attenzione a questo parametro, poiché potrebbero essere utilizzate convenzioni differenti fra reti VLBI e stazioni ESA (solitamente, la convenzioni considera la polarizzazione di un segnale in uscita all'antenna, quindi una segnale trasmesso in RCP deve essere registrato in LCP alle stazioni VLBI)

La conoscenza accurata della posizione delle stazioni cosituisce un elemento utile per il calcolo dello shift in frequenza, subito dal segnale durante il suo viaggio dal trasmettitore al ricevitore. Poiché la sonda si muove rispetto alla Terra, mentre questa compie il proprio moto di rivoluzione e rotazione, la velocità relativa tra target e ricevitore produce una modifica nella frequenza del segnale, dovuta all'effetto Doppler. Per evitare errori durante la registrazione presso antenne VLBI, è necessario correggere tale shift Doppler: viene

Tabella 2.3: Esempio di dati di stazione contenuti nel file SCHED, *freq.dat*

name = mc21cm_g		
rf1	1046.0 [MHz]	1046.0 [MHz]
rf2	1548.0 [MHz]	1548.0 [MHz]
POL	RCP	LCP

calcolata la frequenza effettivamente ricevuta a terra f_r , a partire da quella inviata dal transponder dello spacecraft f_t , nota *a priori*. La velocità relativa $\dot{\rho}$ tra i due corpi, viene confrontata con la velocità di propagazione del segnale radio, cioè la velocità della luce c .

$$f_r = f_t \left(1 - \frac{\dot{\rho}}{c} \right) \quad (2.1)$$

Nel setup della schedula per la sessione di registrazione VLBI, la frequenza f_r deve essere presa come valore di riferimento per il centro del canale. f_t dipende dal valore del *range rate* $\dot{\rho}$, cioè la velocità relativa tra spacecraft e ricevitore; in un generico canale di registrazione potrebbe risultare decentrata, a causa di svariati fattori, cosicché il tono DOR non cadrebbe all'interno della larghezza di banda considerata.

Attraverso la classe di Python *utils_doppler*, sviluppata appositamente per questa analisi, è stata calcolata la frequenza attesa in ricezione alle stazioni di Medicina e Noto, a partire dalle informazioni sulle posizioni estratte dai files di database di SCHED.

Per ottenere le informazioni riguardanti la sonda e i sistemi di riferimento non contenute in tali files, sono stati importati i database ufficiali di missione, gli SPICE Kernels [32]. I kernels sono files, in formato binario o testuale, contenenti dati ausiliari di basso livello, utilizzati per la determinazione delle traiettorie e dell'assetto di un corpo nello spazio. Sono forniti pubblicamente dal Navigation and Ancillary Information Facility (NAIF), un sistema SPICE per l'osservazione, la conoscenza della geometria e l'informazione, sviluppato da NASA per affiancare gli scienziati nella pianificazione e interpretazione delle osservazioni attraverso sonde spaziali, mentre quelli specifici della sonda GAIA sono forniti direttamente da ESA.

Tramite la funzione *spkpos* di Spiceypy [33], il wrapper in linguaggio Python delle routines di SPICE che estrae le effemeridi del target e le posizioni delle stazioni di terra dai kernels, è possibile calcolare il valore di *range rate* da utilizzare per ottenere, infine, lo shift in frequenza atteso sul segnale in arrivo alle stazioni.

2.2 Registrazioni

Come oggetto dell'esperimento, sono state analizzate le registrazioni DOR attuate dai radiotelescopi di Medicina e Noto, nel giorno 22 dicembre 2020, corrispondente al Day Of Year (DOY) numero 357. Le antenne VLBI hanno conseguito sequenze alternate di puntamento di spacecraft (SC) e quasar (QS), per ottenere la corretta calibrazione del segnale. In particolare, la sequenza di registrazione è stata la seguente: SC-QS-SC-QS-SC-QS-SC, in un intervallo temporale di circa un'ora. Il segnale quasar, costituito da rumore bianco, è stato registrato in modalità *wideband* (2 MHz di bandwidth), mentre i toni DOR sinusoidali dello spacecraft sono stati acquisiti in banda ristretta (50 kHz di bandwidth). Il range di frequenze di interesse per una misurazione Delta-DOR si trova al di sotto della banda Ka, in banda X (nell'intervallo di frequenze 5.75 - 10.90 GHz) [34]. Il segnale registrato è costituito da una portante di frequenza 8465 MHz e due principali toni più deboli, calcolati a partire dalla *carrier* in questo modo:

$$F_{harmonic} = F_{carrier} \pm F_{subcarrier} \quad (2.2)$$

Dove $F_{subcarrier} = 5$ MHz. È stato registrato un canale per ogni tono DOR per sessione di tracking dello spacecraft e sono stati fatti accertamenti circa il fatto che l'effetto del moto relativo dello spacecraft sul puntamento non facesse cadere il segnale al di fuori della Full Width at Half Maximum (FWHM) del pattern di radiazione delle antenne. La FWHM rappresenta la larghezza di banda in frequenza di acquisizione dell'antenna all'interno della quale viene attenuata meno della metà della potenza del segnale, per cui la potenza è almeno pari alla metà del suo massimo [35].

A causa di un effetto di parallasse, dovuto alla distanza non considerabile infinita tra spacecraft e ricevitore, il puntamento ha un valore in declinazione e ascensione retta espressi in un sistema di riferimento inerziale (quale J2000) differente per ogni singola stazione, nonostante le registrazioni siano attuate nello stesso istante di tempo e riferite allo stesso target. Infatti, la posizione del satellite può essere descritta a partire da un angolo originato al centro della Terra, in un sistema di riferimento inerziale. Questo angolo non è lo stesso, rilevato da due osservatori posti in luoghi distanti sulla superficie terrestre. Dal momento che il target si trova a una distanza finita, gli osservatori a terra dovrebbero puntare verso due diverse sorgenti per individuare correttamente la sonda. Per il quasar questo non accade, poiché la distanza estremamente elevata che si interpone tra la sorgente e le antenne è approssimabile a una distanza infinita; di conseguenza, gli angoli relativi al quasar sono uguali per entrambi i ricevitori [36].

Nel giorno 22 dicembre 2020, sono stati realizzati gli intervalli di registrazione mostrati nelle tabelle 2.5 e 2.7:

Tabella 2.5: Secondi di registrazione programmati ed effettivi alla stazione di Medicina.

Numero registrazione (MC)	Inizio registrazione programmata	Inizio registrazione effettiva	Fine registrazione effettiva	Secondi di registrazione programmata	Secondi di registrazione effettiva
1	17:11:04.000	17:11:05.529	17:15:04.021	240.000	238.493
2	17:16:34.000	17:16:35.684	17:25:34.016	540.000	538.333
3	17:27:04.000	17:27:05.495	17:35:04.021	480.000	478.525
4	17:36:34.000	17:36:35.432	17:45:34.021	540.000	538.589
5	17:47:04.000	17:47:05.461	17:55:04.023	480.000	478.562
6	17:56:34.000	17:56:35.451	18:05:34.021	540.000	538.569
7	18:07:04.000	18:07:05.529	18:11:04.019	240.000	238.489

Tabella 2.7: Secondi di registrazione programmati ed effettivi alla stazione di Noto.

Numero registrazione (NT)	Inizio registrazione programmata	Inizio registrazione effettiva	Fine registrazione effettiva	Secondi di registrazione programmata	Secondi di registrazione effettiva
1	17:11:04.000	-	-	240.000	0.000
2	17:16:34.000	17:16:34.048	17:25:04.000	540.000	509.951
3	17:27:04.000	17:27:04.048	17:35:02.127	480.000	478.079
4	17:36:34.000	17:36:34.078	17:45:04.029	540.000	509.951
5	17:47:04.000	17:47:04.069	17:55:02.148	480.000	478.079
6	17:56:34.000	17:56:34.046	18:05:03.997	540.000	509.951
7	18:07:04.000	18:07:04.046	18:10:47.150	240.000	223.103

Si possono notare alcuni offset temporali tra i secondi di registrazione programmati e quelli effettivamente registrati, dove le differenze sono dovute al transitorio di avviamento dell'hardware; una registrazione è mancante in seguito a problemi tecnici riscontrati in fase di registrazione.

Per ottenere una rappresentazione visiva del segnale registrato, sono stati realizzati grafici di tipo "waterfall", contenenti l'ampiezza dello spettro del segnale acquisito dai canali registrati alle radiostazioni nel tempo. Per validare la bontà degli algoritmi utilizzati, è stato realizzato un grafico "waterfall" di un segnale fittizio di dinamica arbitraria. È stato quindi simulato un segnale sinusoidale, di frequenza variabile in un intervallo temporale di 240 s, con l'aggiunta di un rumore gaussiano a media nulla per simulare l'effetto del rumore termico del ricevitore.

$$s(t) = A \sin(2\pi \cdot f(t) \cdot t + \phi_0) + N(t) \quad (2.3)$$

Nell'equazione 2.3, A indica l'ampiezza del segnale fittizio $s(t)$, ϕ_0 è la fase del segnale, posta pari a 0 ed $N(t)$ il rumore. $f(t)$ indica la frequenza assegnata al segnale, che varia linearmente nell'intervallo temporale considerato. Nell'immagine inferiore della figura 2.1 è mostrato il "waterfall" dove è possibile osservare la variazione della frequenza imposta al segnale nel tempo t , mentre l'immagine superiore costituisce la rappresentazione dello spettro in un breve intervallo di campioni al tempo iniziale, pari ad un secondo di dati simulati.

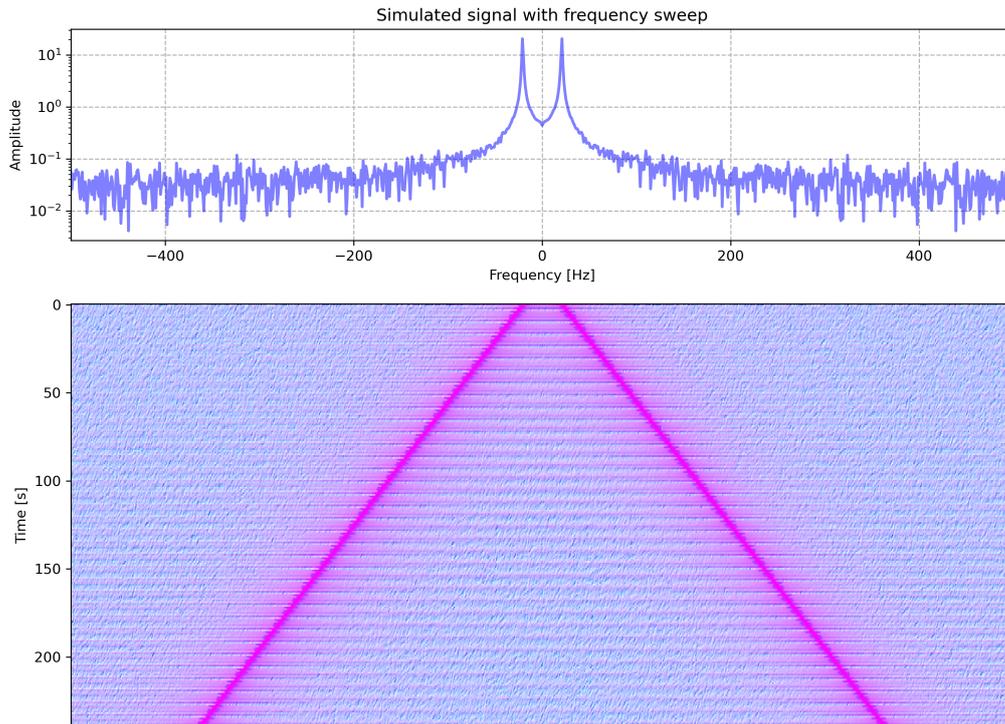


Figura 2.1: Waterfall di un segnale simulato con frequenza variabile nel tempo.

L'immagine superiore in figura 2.2, invece, presenta lo spettro del vero segnale relativo al primo secondo di dati raccolti dal radiotelescopio di Medicina, il 22 dicembre 2020. Quella inferiore costituisce l'andamento del segnale acquisito dal primo canale in tutto l'intervallo di registrazione (circa 240 s). I massimi globali compaiono in corrispondenza della portante e delle sotto-portanti, poste in fase di registrazione al centro del canale.

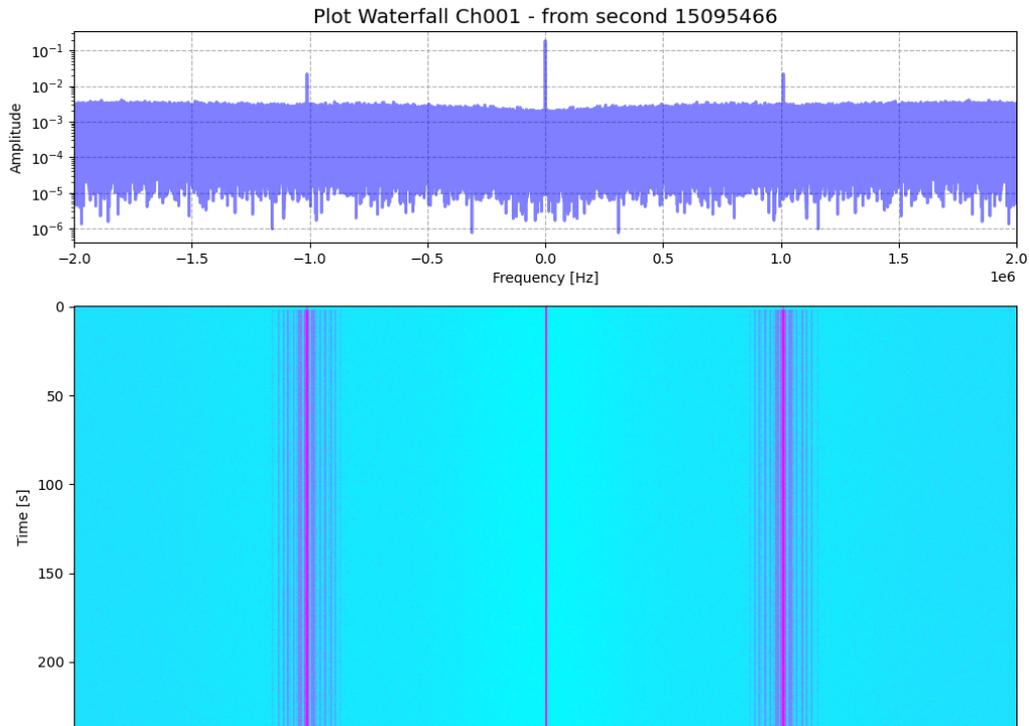


Figura 2.2: Waterfall rappresentante lo spettro del segnale prelevato dal primo canale, durante la prima registrazione effettuata dalla stazione di Medicina il 22 dicembre 2020.

L'output di registrazione deve essere convertito in formato RDEF per assicurare la compatibilità dei dati con il correlatore ESA. Si noti che l'output di registrazione proveniente dalle antenne VLBI, in formato VDIF, è costituito da un segnale reale, mentre, nel caso dei segnali in formato RDEF, si utilizzano unicamente valori complessi, per cui lo spettro risulta simmetrico. I grafici "waterfall" relativi all'intera sequenza di registrazioni considerate sono mostrati nell'appendice 4.

2.3 Formato dei dati di registrazione

Le registrazioni attuate alle stazioni VLBI restituiscono outputs in formato VDIF, che presenta svariate differenze rispetto al formato RDEF, compatibile con il correlatore ESA. Pertanto, i dati sono stati tradotti, prima di essere processati attraverso il correlatore.

2.3.1 Formato VDIF

I files di tipo VLBI Data Interchange Format (VDIF) presentano un formato strutturato in frames di dati, ciascuno contenente un breve “Header”, ossia un’intestazione auto-identificativa, seguito da un array contenente i campioni effettivi. La lunghezza del frame può essere scelta dall’utente per soddisfare il protocollo di trasporto prescelto. In alcuni casi, un intero set di bande di sotto-frequenze campionate, cioè un canale, può essere inserito in ciascun frame di dati. In altre situazioni, un singolo Data Frame può contenere soltanto un canale e, per rappresentare l’intero set di dati, sono necessari multipli Data Frames. Ogni serie temporale di frames provenienti dallo stesso gruppo di sotto-bande è conosciuto come “Data Thread”. Al suo interno, ciascun frame di dati è identificato con un “Thread ID”, inserito nell’Header del Data Frame. Per un’effettiva trasmissione tramite una rete di dati in serie o per la conservazione delle informazioni su un file di memoria, la lista di Data Threads comprendente i set di dati è incorporata in un’unica corrente di dati in serie, detta “Data Stream”. Un file di registrazione in formato VDIF deve soddisfare le seguenti specifiche:

- Un Data Thread può essere discontinuo nel tempo con una risoluzione di un Data Frame.
- Ciascun Data Frame può includere campioni di un solo bit o di più bit fino a 32 bit/campione.
- Possono essere inclusi fino a 1024 Data Threads, ciascuno con un unico Thread ID, in un singolo Data Stream.
- La manipolazione necessaria per spostare i dati attraverso le varie modalità di trasmissione deve essere minima.
- Devono essere supportati Data Rates di almeno 100 Gbps.
- Il carico di dati deve essere basso e pratico.
- Le osservazioni devono essere supportate anche in presenza di correzioni temporali e periodi di puntamento discontinui.
- I dati VDIF devono essere compatibili con tutti i metodi di trasporto dati attesi.
- Un ammontare limitato di dati ausiliari, definiti dall’utente, deve poter essere ammesso nel Data Stream.
- All’interno di certi limiti prestabiliti, dei dati fuori dall’ordine temporale devono essere accettati dentro un Data Thread.

La lunghezza di un Data Frame è sempre un multiplo di 8 bytes, per assicurare la massima compatibilità con schemi di memoria diversi. Tale lunghezza è scelta in modo che venga creato un numero intero di Data Frames in un flusso di dati continuo di durata pari a 1 s. Ogni Data Frame VDIF contiene un Header, che può avere una lunghezza di 16 o 32 bytes. Analizzando i contenuti specifici all'interno delle parole nell'Header, si trovano le seguenti informazioni:

- **word 0:**

Bit 31 : si ha un flag booleano, se è uguale a 1, il dato archiviato non è valido.

Bit 30 : è presente un altro flag relativo a versioni passate, se è uguale a 1, allora l'Header è composto soltanto da 4 parole da 32 bit.

Bit 29-0 : vi sono contenuti i secondi relativi all'epoca di riferimento; un giorno viene considerato pari a 86400 s.

- **word 1:**

Bit 31-30 : non sono assegnati, vengono posti pari a 0.

Bit 29-24 : indicano l'epoca di riferimento; contiene un periodo di sei mesi, prendendo come inizio (0) il 1° gennaio 2000 a mezzanotte, in formato UTC. Il secondo periodo comincia il 1° luglio.

Bit 23-0 : contengono il numero di Data Frame all'interno di un secondo, si tratta di un numero intero che parte da 0.

- **word 2:**

Bit 31-29 : rappresentano il numero della versione del file VDIF.

Bit 28-24 : $\log_2(nchann)$, dove il numero di canali *nchann* deve essere una potenza di 2.

Bit 23-0 : forniscono la lunghezza del Data Frame (Header incluso) in unità di 8 bytes.

- **word 3:**

Bit 31 : indicano la tipologia di dati (reali = 0, complessi = 1). Se i dati sono numeri complessi, allora vengono archiviati due campioni per mantenere i valori in quadratura e in fase.

Bit 30-26 : contengono il numero di bits per campione a cui viene sottratto il numero massimo di bits, cioè 32, per campione, se ciascun campione è complesso.

Bit 25-16 : indicano il Thread ID da 0 a 1023.

Bit 115-0 : forniscono l'ID della stazione scritto nell'American Standard Code for Information Interchange (ASCII). Se i primi 8 bits sono inferiori a 48, l'ID è numerico.

• word 4-7:

Bit 31-24: danno informazioni sulla versione dei dati estesa (Extended Data Version, EDV), utilizzata per i dati generati dall'utente.

Bit ulteriori: possono contenere il formato e la modalità di interpretazione dei dati utente estesi (Extended User Data) se questi sono indicati come valori di EDV. Altrimenti, le parole dalla 4 alla 7 risultano pari a 0.

	31	30	29	28	27	26	25	24	23	22	21	20	19	18	17	16	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0	bit	
1	Seconds from epoch																																	
2	0	0	Reference epoch						Data frame number within second																									
3	Version			Log2(nchann)						Data frame length																								
4	Bits/sample						Thread ID												Station ID															
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	...																																	

Figura 2.3: Struttura di un Header identificativo di un file VDIF.

Il numero di canali che può essere utilizzato in un array di dati multicanale è limitato a 2^n ; tuttavia, l'utilizzo di multipli Data Threads a singolo canale permette all'utente di trasmettere un numero arbitrario di canali ed è un formato con maggiore compatibilità per le generazioni di software di correlazione in via di sviluppo. Ogni numero di bit/campione da 1 a 32 è supportato. I campioni possono essere reali o complessi, come spesso accade nel caso di algoritmi di processing di un segnale digitale. I campioni VDIF codificati sono rappresentati dal numero di bit desiderato in una sequenza binaria, partendo da 0 per il campione "più negativo" e 1 per il valore "più positivo" [37].

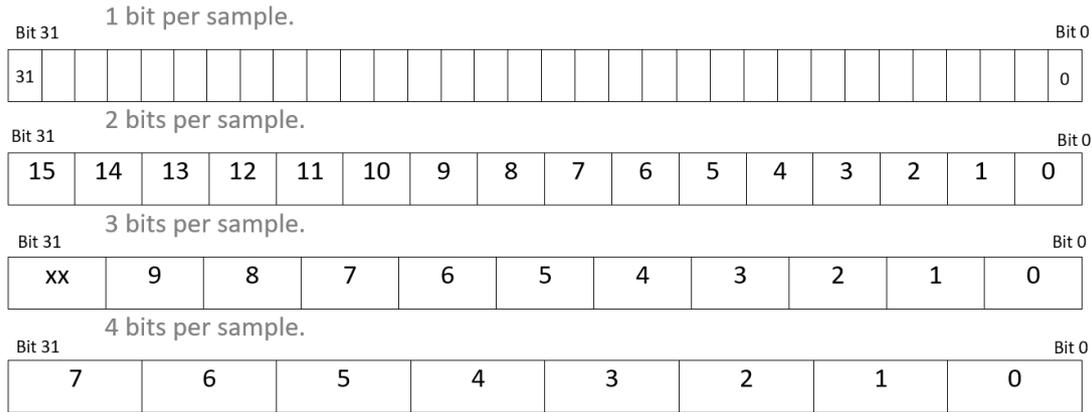


Figura 2.4: Struttura di una parola da 32 bit all’interno di un file VDIF. Nei file VDIF, a differenza di quelli in formato RDEF, sono presenti soltanto dati reali. (xx indica bit inutilizzati, fissati a 0)

2.3.2 Formato RDEF

Il correlatore ESA non è compatibile con i dati in formato VDIF, pertanto, è necessario cambiare il formato dei dati in Raw Data Exchange Format (RDEF). Il formato RDEF è stato sviluppato dal Consultative Committee for Space Data Systems (CCSDS) per favorire lo scambio di dati tra diverse agenzie, attraverso interazioni automatizzate. Le caratteristiche delle registrazioni (frequenza di campionamento e quantizzazione) sono definite all’interno del file RDEF. Quando viene realizzata una misurazione Delta-DOR che coinvolge due o più agenzie, deve esistere una reciproca condivisione dei dati in questo formato, perlomeno tra l’agenzia che ha portato avanti l’acquisizione e quella che fornisce i risultati, attuando il processo di correlazione.

Il Delta-DOR RDEF è realizzato con due tipologie di file: l’*Observation File*, composto da sequenze di testo in codice ASCII e il *Product File*, costituito da una sequenza di dati binari di registrazione. Si ha un *Observation File* per ogni stazione ricevente e per ogni sessione di misurazione; esso contiene i parametri necessari per descrivere la sessione di registrazione e per supportare la correlazione dei dati. Ogni *Observation File* contiene:

- Una singola sezione di *Observation Header*
- Una o più sezioni di scansione
- Una sezione finale

Ciascuna sezione del file è costituita da dati rappresentati in linee di codice ASCII; ogni riga deve possedere le seguenti caratteristiche:

1. Deve avere lunghezza variabile fino a un massimo di 180 caratteri.

2. Possono essere presenti solo caratteri ASCII stampabili e spazi vuoti.
3. Non possono essere utilizzate righe bianche.
4. Ciascuna sezione specificata deve contenere righe di commento.
5. Il primo carattere in ogni riga deve identificare il tipo di informazione contenuta in essa.
6. Uno o più spazi vuoti possono essere usati per separare i vari elementi all'interno di ciascuna riga.
7. Ogni sezione (a eccezione di quella finale) deve cominciare con il carattere "Z".
8. Ogni riga deve essere determinata andando a capo (carriage return) o inserendo un avanzamento di riga (line feed) o entrambe le cose.

L'Header dell'*Observation File* RDEF, come per il formato VDIF, è un codice identificativo; la sezione di scansione descrive l'osservazione e fornisce la lista dei *Product Files* associati alla scansione; l'ultima sezione contiene una riga finale, opzionalmente preceduta da alcune linee di Log. Le misurazioni Delta-DOR richiedono sequenze alternate di registrazioni del segnale di spacecraft e quasar, per cui, anche il contenuto dell'*Observation File* risulta suddiviso in più scansioni.

Il *Product File* presenta, invece, i dati collezionati durante la sessione di misurazione Delta-DOR. Esso consiste in registrazioni ordinate temporalmente, ciascuna suddivisa in due tipologie di strutture: un Header e una parte di dati. Un *Product File* racchiude i dati relativi a una singola scansione Delta-DOR, una sola stazione di terra e un solo canale di frequenze. Esso contiene svariate registrazioni, ciascuna con esattamente un secondo di dati e le relative informazioni per correlare quel secondo. Il *Product File* è ripartito in due sezioni: la sezione di Header e quella contenente i dati. La lunghezza dell'Header è fissa, mentre quella della sezione dati varia ed è determinata dalla frequenza di campionamento e dalla dimensione dei campioni di dati registrati. La lunghezza totale della sezione dati è totalmente determinata dall'informazione descritta nell'Header. La dimensione dei singoli elementi è di 8 bit. La sezione di Header contiene informazioni relative alla configurazione di stazione e ai parametri di base utilizzati nella registrazione stessa. La sua struttura è fissa, contiene 23 parametri e due campi vuoti per le espansioni future:

1. Nome dell'elemento
2. Lunghezza dell'elemento in bytes
3. Tipologia di dati contenuti nell'elemento
4. Breve descrizione dell'elemento

5. Esempi di valori ammissibili
6. Se un valore nell'elemento è obbligatorio o meno

Record label (RDEF)	character*4
Record length	unsigned integer*4
Station ID, unsigned integer*2	Record version ID, unsigned integer*2
Sample size, unsigned integer*2	Spacecraft ID, unsigned integer*2
Sample rate, unsigned integer*4	
Agency flag, unsigned integer*2	Validity flag, unsigned integer*2
RF to IF downconversion	float*8
IF to channel downconversion	float*8
Day of year, unsigned integer*2	Year, unsigned integer*2
Second of day	unsigned integer*4
Picoseconds of the second	float*8
Channel accumulated phase	float*8
Channel phase polynomial coefficient 0	float*8
Channel phase polynomial coefficient 1	float*8
Channel phase polynomial coefficient 2	float*8
Channel phase polynomial coefficient 3	float*8
Empty, future use (10 lines)	???*40
...	
Empty, internal agency use (9 lines)	???*36
...	
End label, (-99999)	integer*4

Figura 2.5: Struttura dell'Header di un file RDEF, ogni riga è composta da 4 bytes, per un totale di 44 righe.

La sezione dati del *Record File* contiene soltanto i campioni registrati al ricevitore in fase (I) e in quadratura (Q), cioè le componenti, reale e immaginaria, modulate in ampiezza e sfasate tra loro di 90° , in cui viene scompattato il segnale registrato [38]. I campioni

sono riuniti in parole di 32 bit. I dati I e Q per un dato campione sono adiacenti tra loro; vengono inseriti tra 1 e 16 campioni complessi in ogni parola di 32 bit, in base a quanti bit/sample sono utilizzati. Può essere applicato il troncamento per ridurre il numero di bit/sample al valore desiderato: ciò crea un offset nell'output che deve essere corretto nella fase di post-processing; altrimenti è necessario operare una trasformazione sul singolo campione [39]. Come nel caso dei files in formato VDIF, tutti i campioni sono quantizzati in parole da 32 bits e ciascun campione viene trascritto da Least Significant Bit (LSB) a Most Significant Bit (MSB); il primo è costituito dal campione in fase, segue il campione in quadratura. Nel caso dei files RDEF, il numero massimo di bit/sample è solamente 16.

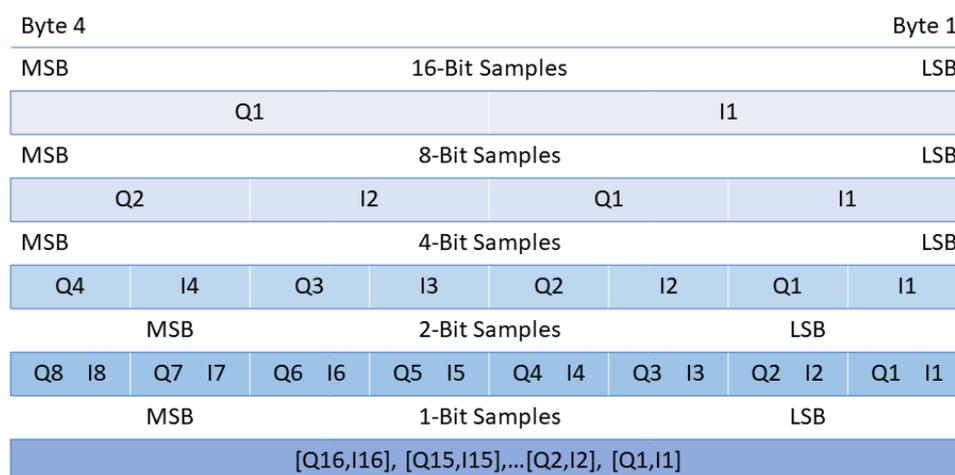


Figura 2.6: Parola di 32 bit in cui è contenuto un campione all'interno di un *Product File* RDEF.

Il correlatore sviluppato da ESA legge i dati di registrazione in formato convertito dal VDIF all'RDEF, realizzando idealmente una correlazione incrociata del segnale nel caso di registrazione quasar, e un'estrazione di fase, convertita in delay temporale, in caso di registrazione spacecraft. In questo modo è possibile ricavare le informazioni richieste per il calcolo della posizione del satellite.

Capitolo 3

Analisi dati

3.1 Correlazione incrociata

Per effettuare il calcolo del ritardo temporale relativo all'arrivo del segnale alle due stazioni, nel caso di trasmissioni della quasar viene attuata una correlazione incrociata (Cross Correlation) tra il segnale ricevuto dalla prima stazione e quello rilevato dalla seconda, dopo un'opportuna correzione dell'effetto Doppler.

La correlazione incrociata è una tecnica di elaborazione che permette di misurare la similitudine tra due segnali, in funzione della traslazione dell'uno rispetto all'altro, ed è simile alla convoluzione di due funzioni. Fra le sue caratteristiche, è possibile realizzare anche la correlazione di un segnale con se stesso (autocorrelazione) per calcolare l'energia del segnale, a partire dal valore di massimo della funzione, che sarà collocato ad un valore di ritardo pari a zero. Essendo f e g funzioni continue, la correlazione incrociata può essere definita come segue:

$$(f \star g)(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} \overline{f(t)}g(t + \tau)dt \quad (3.1)$$

Dove $\overline{f(t)}$ rappresenta il complesso coniugato di $f(t)$ e τ è chiamato ritardo. Se f e g presentano un massimo di correlazione in un particolare τ , una caratteristica della prima funzione si può riscontrare nella seconda al tempo $t + \tau$, cioè g si può definire come f ritardata di τ [40].

Il segnale della quasar, espresso come fasore complesso, è costituito da rumore bianco, pertanto, per estrarre l'osservabile di ritardo è sufficiente attuarne la correlazione in senso classico. La sonda non trasmette un segnale di tipo pseudo-noise ad ampio spettro simile a quello della quasar, per motivi di efficienza legati alla potenza di trasmissione; vengono invece inviati dei toni DOR, segnali sinusoidali a frequenze date all'interno della banda in downlink dello spacecraft. Tuttavia, la correlazione di sinusoidi andrebbe a produrre un risultato ambiguo ed è quindi necessario impiegare una tecnica differente,

basata sull'estrazione di fase differenziale ad ogni canale, per poi trovare il vero valore di ritardo temporale con una funzione di best-fit, in un grafico fase/frequenza comprendente informazioni da registrazioni simultanee di più canali.

Nel dettaglio, il correlatore dello spacecraft sfrutta un modello matematico noto *a priori*, riguardante la distanza e la velocità relativa tra sonda e stazioni, che inizialmente deriva la frequenza trasmessa a bordo e, in seguito, blocca il fasore relativo al segnale, separatamente per ogni stazione, compensando l'effetto della dinamica. Successivamente, i fasori fermati sono filtrati e correlati per determinare la fase differenziale. Quest'ultima costituisce un risultato ambiguo, in quanto, ogni spostamento del segnale in arrivo di un multiplo intero del suo periodo sinusoidale porta a un picco di correlazione. Per eliminare l'ambiguità, ci si appoggia alla misurazione DOR della quasar, la quale può essere considerata come il ritardo temporale dell'arrivo del segnale alle due stazioni. La misurazione quasar costituisce un'informazione *a priori* per indirizzare correttamente la risoluzione dell'ambiguità nella correlazione del segnale spacecraft e, infine, ottenere il valore di ritardo temporale calibrato.

Quando viene svolta la correlazione di un segnale, proveniente da uno spacecraft in movimento e ricevuto da due stazioni di terra differenti, vengono riscontrati degli shift nelle frequenze ricevute, a causa dell'effetto Doppler dovuto alla velocità relativa tra la sonda e le stazioni. Se il segnale viene correlato senza che sia applicata una correzione relativa a questo fenomeno, il picco di correlazione scompare. Quindi, la presenza di uno shift in frequenza sufficientemente grande non compensato fa sì che la correlazione fallisca.

Per esempio, dati due segnali $A(t)$ e $B(t)$ (contenenti entrambi uno stesso segnale, ma affetto da rumore non correlato fra i due), essi restituiscono un picco quando vengono correlati fra loro. Se viene, invece, applicato uno shift in frequenza apprezzabile su uno di essi (in questo caso il segnale $B(t)$), si nota che il massimo globale di correlazione scompare (come mostrato in figura 3.1). In particolare, il segnale $A(t)$ è generato attraverso una funzione random reale (rappresentante il segnale correlato), scalato di una certa potenza, a cui è stato applicato un filtro di Hilbert per generarne la parte complessa, e sommato ad un rumore, mentre il segnale $B(t)$ è costituito da una traslazione temporale del segnale correlato di $A(t)$, con l'aggiunta di un rumore non correlato. A causa della similitudine tra i due segnali, è sufficiente applicarvi la correlazione incrociata per ottenere un massimo globale nel risultato. Tuttavia, appena viene variata la frequenza del segnale $B(t)$, il picco di correlazione scompare, poiché la somiglianza tra i due segnali si riduce.

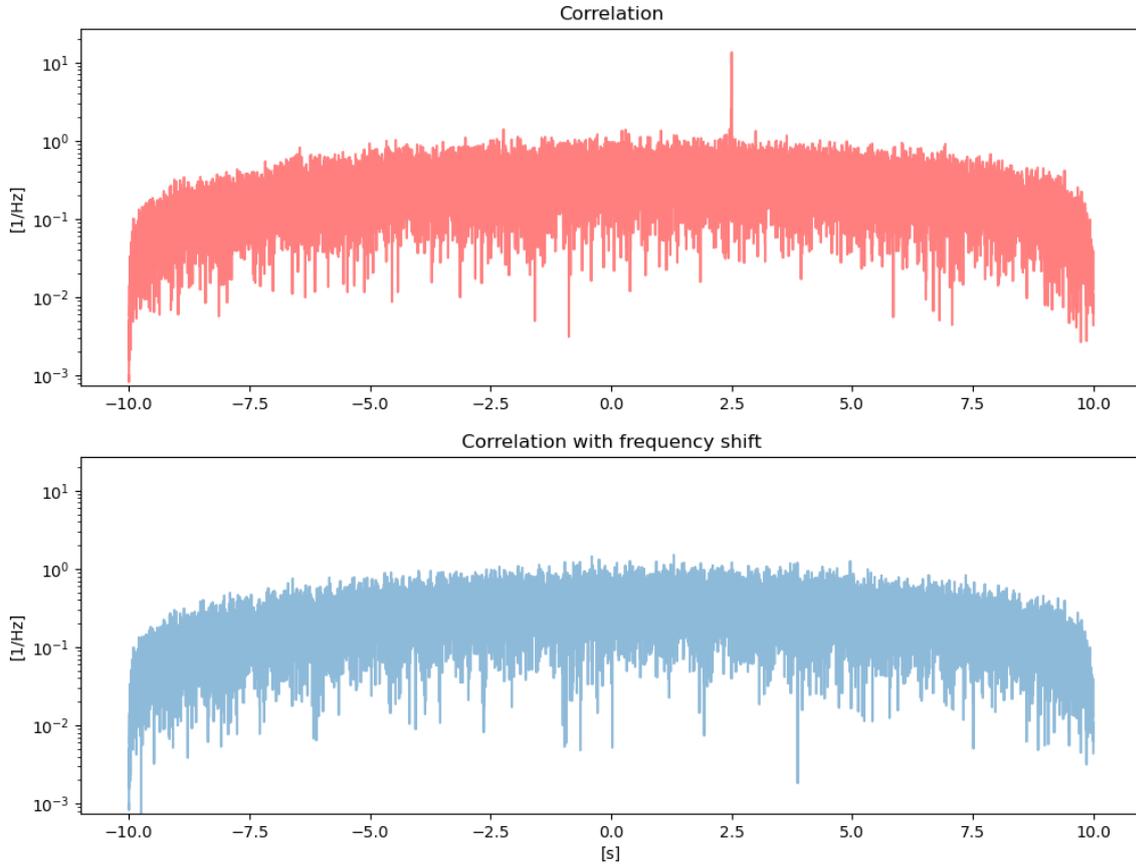


Figura 3.1: Correlazione dei segnali $A(t)$ e $B(t)$ contenente segnale correlato senza shift in frequenza (sopra) e con uno shift in frequenza del segnale $B(t)$ (sotto), dove il picco di correlazione è assente.

Lo shift in frequenza applicato al segnale $B(t)$ riferito alla figura 3.1 in basso è stato applicato attraverso una proprietà della trasformata di Fourier: tenendo presente che $\omega = 2\pi f$, in cui ω rappresenta la pulsazione di una sinusoide ed f la sua frequenza, e indicando la trasformata di Fourier di un segnale $f(t)$:

$$F(\omega) = F[f(t)] \quad (3.2)$$

Quindi è possibile ottenere una variazione in frequenza del segnale, agendo nel dominio del tempo, secondo la proprietà [41]:

$$F(\omega - \omega_0) = F[f(t)e^{j\omega_0 t}] \quad (3.3)$$

Andando a variare alcuni parametri delle funzioni utilizzate per rappresentare i segnali fittizi sopra descritti, è stato svolto uno studio sull'andamento del valore massimo di cor-

relazione, in modo da prevedere un possibile comportamento di sistemi reali, in funzione del rumore termico presente nelle stazioni di terra e del Doppler shift residuo che può essere presente nei segnali.

La simulazione è basata su dati tipici dei ricevitori utilizzati e considera un rumore bianco come segnale proveniente dalla quasar osservata. In particolare, per le osservazioni operate tramite le antenne VLBI appartenenti alle radiostazioni di Medicina e Noto, si hanno le seguenti specifiche [27]:

- $A_{antenna}$: superficie di raccolta dell'antenna di circa 800 m²
- B : larghezza di banda di acquisizione di $2 \cdot 10^6$ Hz
- T_{sys} : temperature di sistema che si mantengono tra i 20 e i 70 K
- f : frequenza del segnale quasar osservata intorno agli $8 \cdot 10^9$ Hz

I due segnali simulati, di potenza unitaria, sono stati scalati in base alle potenze ricavate a partire dai dati precedenti. La potenza del segnale quasar in Watt è stata calcolata assumendo una densità di flusso proveniente dalla quasar pari a 0.5 Jy (Jansky). I Jansky costituiscono l'unità di misura astronomica per definire la densità di flusso proveniente da una sorgente; la densità di flusso è costituita dall'integrale della radianza spettrale in funzione dell'angolo solido della sorgente [42].

$$1Jy = 10^{-26} \frac{W}{m^2 \cdot Hz} \quad (3.4)$$

La densità di flusso della quasar S_{QS} è stata inserita nell'equazione che ricava la potenza del segnale in Watt, P_{QS} [43]:

$$P_{QS} = S_{QS} \cdot A_{antenna} \cdot f \cdot 10^{-26} \quad (3.5)$$

Anche il rumore termico dovuto alle temperature operative è stato considerato nell'analisi. Il segnale della quasar è stato moltiplicato per la potenza del rumore P_{noise} , calcolata come segue:

$$P_{noise} = k \cdot T_{sys} \cdot B \quad (3.6)$$

In cui k rappresenta la costante di Boltzmann, $k = 1.380649 \cdot 10^{-23} JK^{-1}$, una costante di proporzionalità tra temperatura ed energia [44]. Per l'analisi del comportamento del massimo globale di correlazione in funzione delle potenze in gioco, sono stati introdotti dei fattori di ridimensionamento: il rumore termico viene scalato attraverso una variazione della temperatura di sistema, mentre al segnale quasar è applicato l'offset in frequenza

precedentemente descritto, che necessita di una compensazione per ritrovare un picco di correlazione. È stato calcolato l'andamento del massimo globale di correlazione in funzione dei due parametri di scala: lo scaling delle temperature di sistema e la correzione in frequenza applicata al segnale ricevuto dalla seconda stazione.

All'aumentare del rumore termico e dell'errore introdotto nella correzione in frequenza, il massimo globale si riduce rispetto al rumore, fino a non essere più rilevabile. I diversi colori in figura 3.2 e 3.3 mostrano la diminuzione dell'elevazione del picco rispetto al rumore termico, se viene applicato un fattore di scala crescente su quest'ultimo. Per realizzare questo ridimensionamento è stato inserito il fattore di scala α nell'equazione 3.7 ottenendo la seguente versione:

$$P_{noise} = k \cdot \alpha T_{sys} \cdot B \quad (3.7)$$

I tre riquadri in figura 3.2 rappresentano, invece, l'andamento del picco di correlazione al variare dell'errore nella correzione in frequenza del segnale, dove l'errore assume i valori: 0.00 Hz (segnali solo sfasati temporalmente), e 1.50 Hz e 2.00 Hz (segnali sfasati temporalmente, e con un differente Doppler shift nella seconda stazione rispetto alla prima).

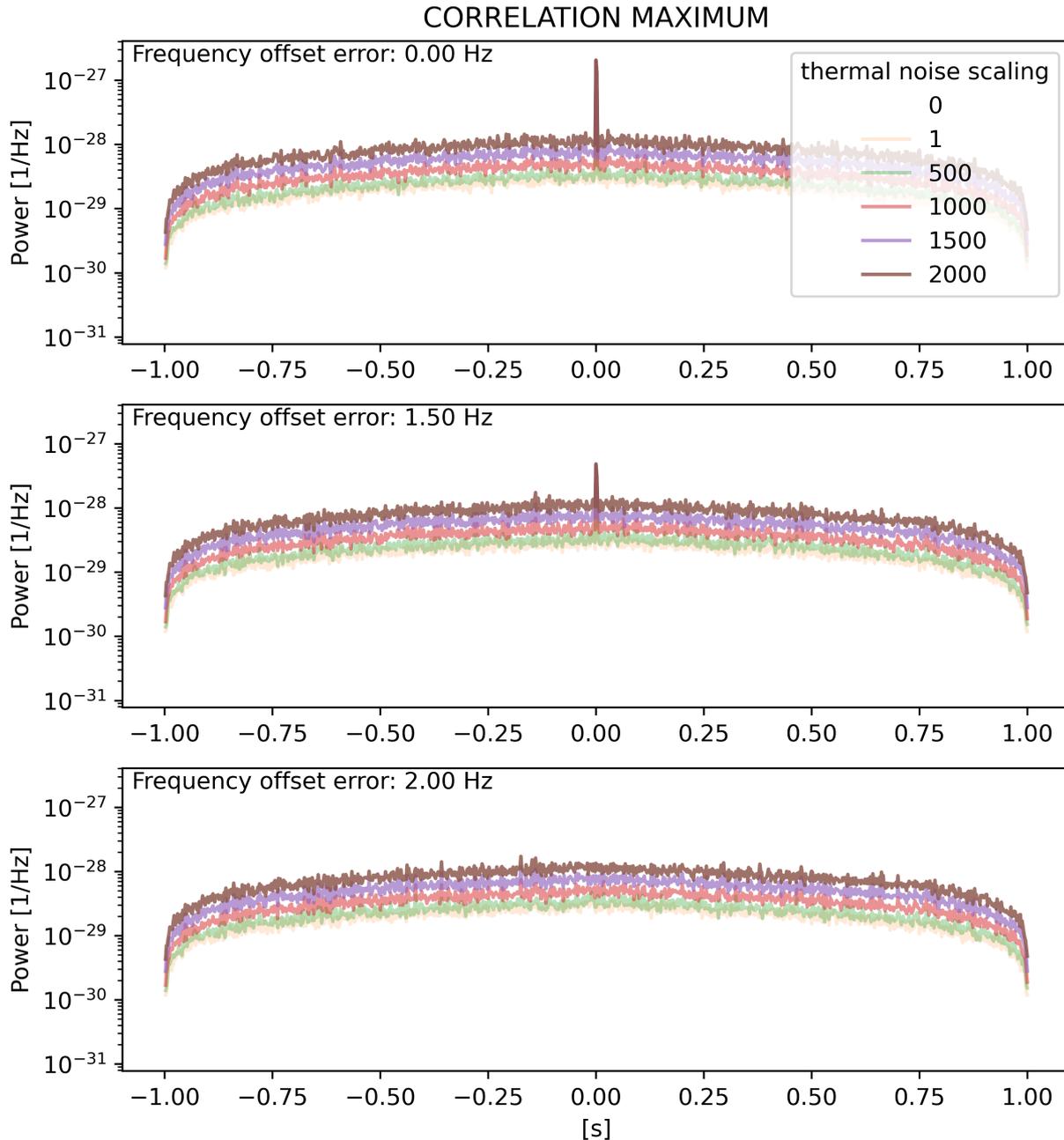


Figura 3.2: Andamento del risultato della correlazione all'aumentare dell'errore inserito nella correzione in frequenza.

Si nota che, all'aumentare del rumore termico in entrambe le stazioni, l'SNR del massimo di correlazione si riduce e risulta immediato constatare che esiste un limite di potenza di rumore termico tale per cui è possibile estrarre correttamente il delay temporale, dato il tempo di integrazione considerato.

Tabella 3.1: Massimo globale di correlazione trovato al variare del offset in frequenza.

Offset in frequenza [Hz]	Massimo di correlazione [1/Hz]
0.0	20.41e-28
1.5	4.87e-28
2.0	1.73e-28

Analogamente, il valore del massimo di correlazione (tabella 3.1) è affetto dall'errore nella correzione in frequenza del segnale (in questo caso modellato come un offset in frequenza nella seconda stazione rispetto alla prima), e si nota che con 2 Hz di shift in frequenza il picco scompare (figura 3.2). Pertanto, risulta di interesse valutare il comportamento dell'SNR del massimo di correlazione al variare di tale offset in frequenza, come viene mostrato in figura 3.3.

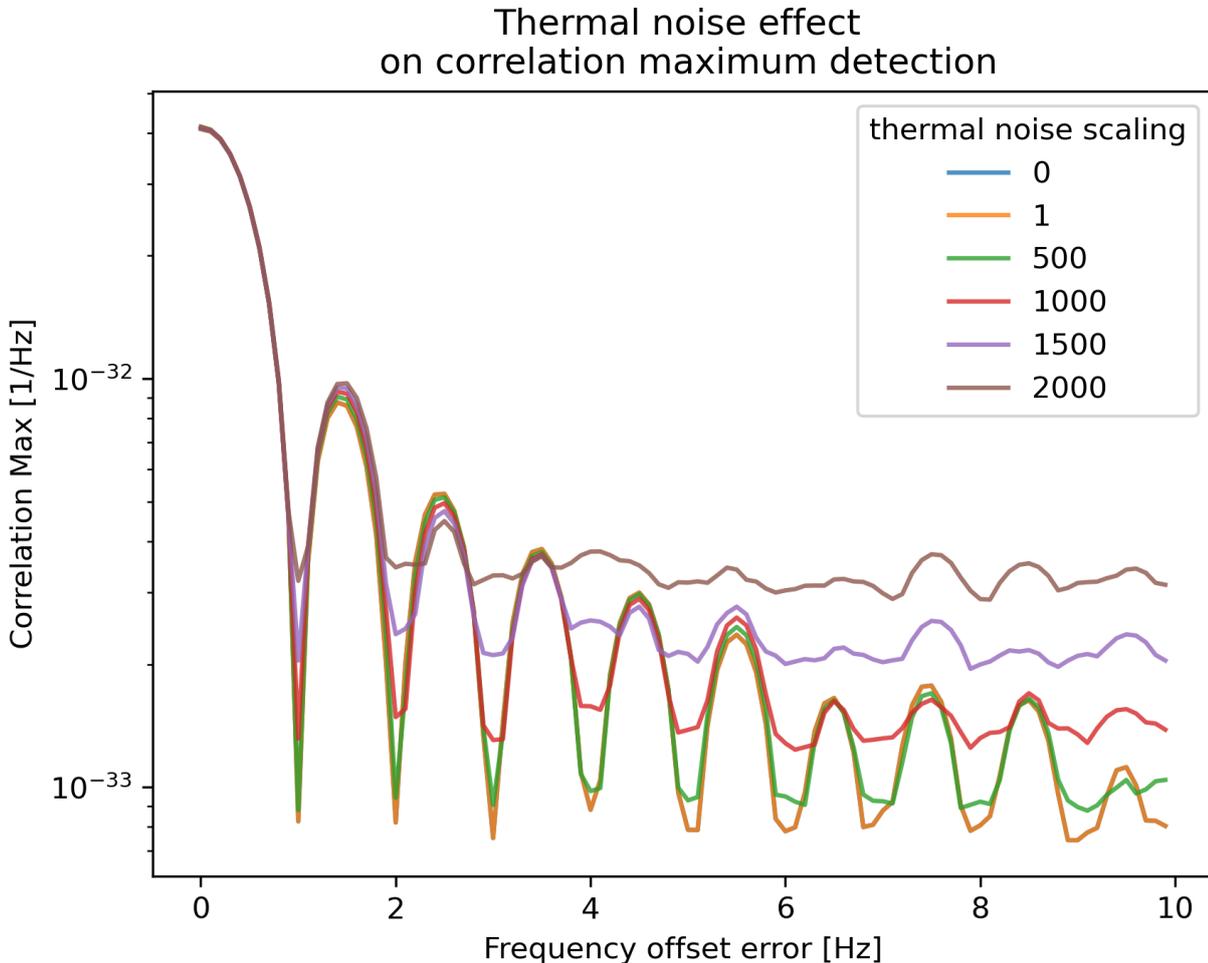


Figura 3.3: Comportamento del massimo globale di correlazione al variare della temperatura di sistema e dell'errore nella correzione in frequenza applicata al segnale. I vari colori rappresentano i diversi valori dello scaling assegnato al rumore termico.

Se il picco è individuabile, allora si può trovare il massimo errore nell'offset in frequenza applicabile, che in questo caso ha il minimo della funzione intorno a un offset pari ad 1 Hz. Come detto in precedenza, anche in questo caso il rumore termico potrebbe sovrastare ogni massimo di correlazione legato al segnale vero, quindi, oltre tale valore, diventa impossibile estrarre ulteriori informazioni dalle registrazioni senza cambiare altri parametri (quali il tempo di integrazione).

3.2 Studio dell'offset in frequenza

Lo shift in frequenza da applicare al segnale reale per attuare la correzione dell'effetto Doppler viene ricavato a partire da diversi fattori: dati riguardanti la posizione delle stazioni sulla Terra, la posizione della quasar nel cielo (espressa in angoli, quali ascensione retta ed elevazione in un sistema di riferimento inerziale) e la velocità relativa tra target e ricevitori lungo la linea di vista. È stato realizzato un codice Python per l'estrazione dell'offset in frequenza da applicare al segnale quasar ricevuto da una delle due stazioni, prima che venga eseguita la correlazione. È stata considerata la posizione delle stazioni di Medicina e di Noto sulla Terra in un sistema di riferimento inerziale nell'intervallo di tempo che va dalle ore 17:11:04 alle 18:11:04 del 22 dicembre 2020, con passo dt di 0.1 s. Le posizioni e le velocità di deriva sulla crosta terrestre delle stazioni sono state estratte dal file SCHED *locations.dat*. Attraverso i metodi della classe *utils_doppler*, che fa uso delle funzioni a più basso livello di SPICE, è stata ricavata la velocità relativa dei ricevitori di Noto e Medicina rispetto al Sole, nell'intervallo temporale considerato. Successivamente, è stata ottenuta la velocità lungo la linea di vista e, infine, l'offset in frequenza richiesto. Seguono i parametri utilizzati per il processo:

- **Velocità delle stazioni rispetto al Sole in coordinate cartesiane nel sistema di riferimento fisso J2000:** calcolate come $\frac{d}{dt}(pos_{ES} + pos_{RE})$, dove pos_{ES} è la posizione del centro della Terra rispetto al Sole e pos_{RE} è quella del ricevitore rispetto al centro della Terra. Il sistema di riferimento J2000 (o EME2000) è un sistema celeste, cioè fisso rispetto a un catalogo di precise sorgenti extragalattiche, ed è definito rispetto all'equinozio e all'equatore terrestre all'epoca J2000 (1° gennaio 2000 alle ore 12:00): l'asse x coincide con l'intersezione tra il piano equatoriale e i piani dell'eclittica; l'asse z è normale all'equatore medio in data J2000, che corrisponde approssimativamente all'orientazione dell'asse di rotazione terrestre in tale epoca; l'asse y è orientato ortogonalmente agli altri due, seguendo la regola delle terne destrorse [45].
- **Velocità relativa della quasar lungo la linea di vista dei ricevitori V_{LOS}** (Line Of Sight Velocity): data dal prodotto scalare tra la velocità della stazione

rispetto al Sole e la direzione della quasar in J2000. Per ottenere il versore direzione della quasar in coordinate cartesiane, è stato utilizzato un modulo di *Astropy*, una estensione di Python per il calcolo astrodinamico. La quasar può essere considerata una radiosorgente fissa rispetto alla Terra a causa delle elevatissime distanze interposte tra essa ed il pianeta. Poiché la Terra si muove all'interno del sistema solare e compie un moto di rotazione su sé stessa, lo shift Doppler subito dal segnale risulterà variabile nel tempo.

- **Shift in frequenza subito dal segnale a causa dell'effetto Doppler:** ottenuto attraverso la formula (analoga all'equazione 2.1):

$$f_{offset} = f_{rif} \left(1 - \frac{V_{LOS}}{c} \right) \quad (3.8)$$

Dove $c=299792458$ m/s è la velocità della luce e f_{rif} la frequenza inviata dallo spacecraft.

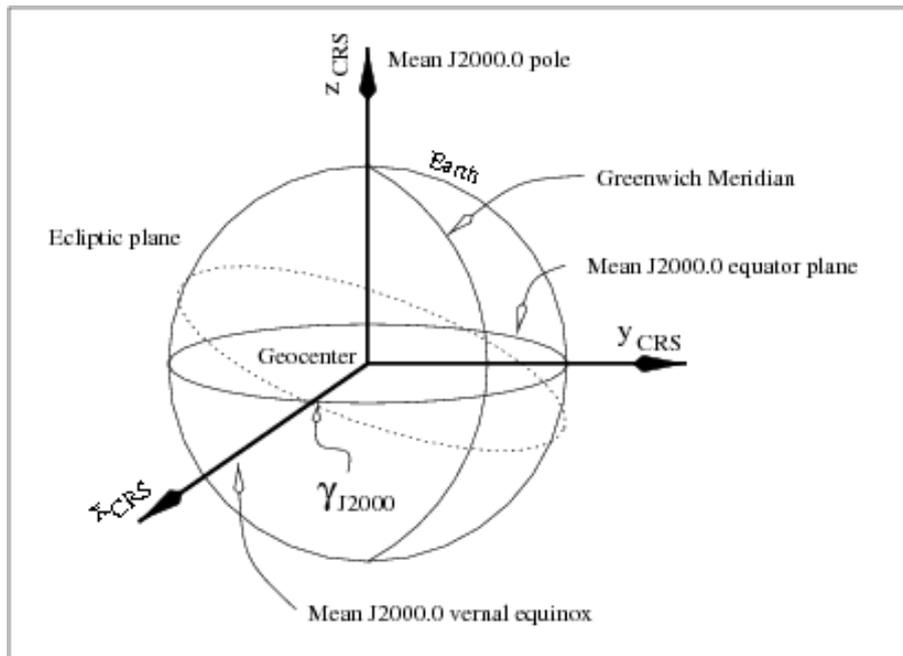


Figura 3.4: rappresentazione del sistema di riferimento fisso J2000. [46]

Il procedimento descritto è stato applicato per entrambe le stazioni di Noto e Medicina. Per il segnale spacecraft, è stata quindi calcolata la variazione dell'offset in frequenza (l'effetto Doppler) in funzione del tempo, causata dalla componente della velocità del target lungo la linea di vista delle singole stazioni di terra. La stessa procedura, utilizzando la direzione della quasar come riferimento per la linea di vista, ha permesso di stimare l'effetto Doppler anche per le misure del segnale quasar. In figura 3.5 è possibile vedere il valore di offset in frequenza stimato, calcolato secondo il metodo descritto in precedenza.

Il valore è differente fra le due stazioni e, considerando solamente un'ora di registrazione, è possibile apprezzare solo parzialmente la componente più evidente, ovvero l'andamento sinusoidale introdotto dalla rotazione della Terra.

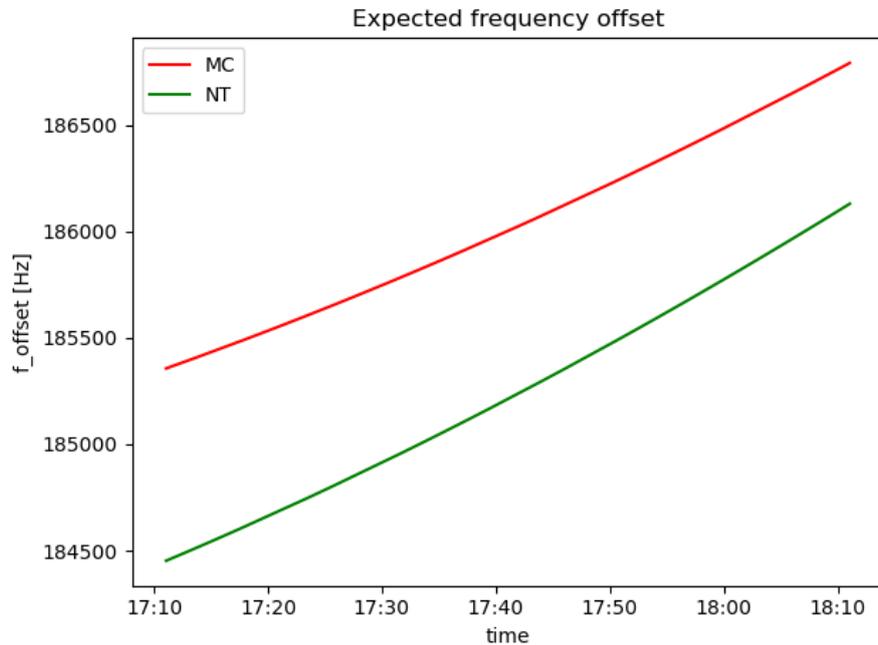


Figura 3.5: Variazione temporale dello shift in frequenza subito dal segnale spacecraft, ricevuto dalle stazioni di Medicina e Noto.

3.3 Input del correlatore

I valori effettivamente inseriti all'interno del correlatore sono stati generati dal team di Flight Dynamics di ESA, con considerazioni analoghe a quelle sopra presentate. Le informazioni di geometria sono raccolte nei cosiddetti FD files, e contengono informazioni sia sullo stato dello spacecraft, che sulla posizione relativa della quasar, rilevate dalle stazioni di terra. È stata sviluppata una funzione in Python all'interno della classe chiamata *utils_FD*, per l'estrazione dei dati contenuti negli FD files, ovvero:

1. Istante temporale considerato in UTC, estratto come oggetto *datetime*
2. Distanza dello spacecraft dalla stazione considerata (*range*) [Km]
3. Velocità dello spacecraft rispetto alla stazione di terra (*range rate*) [km/s]
4. Accelerazione dello spacecraft rispetto alla stazione (*range rate derivative*) [m/s^2]
5. Angolo di elevazione dello spacecraft sull'orizzonte [deg]
6. Azimuth dello spacecraft [deg]

7. Posizione dello spacecraft in coordinate cartesiane rispetto a un sistema di riferimento fisso (International Celestial Reference Frame - ICRF, per gli scopi di questa analisi si può considerare coincidente con J2000) [km]
8. Velocità dello spacecraft in coordinate cartesiane in ICRF [km/s]
9. Ritardo differenziale relativo alla quasar (τ) [ns]
10. Derivata del ritardo differenziale relativo alla quasar ($\dot{\tau}$) [ns/s]
11. Angolo di elevazione della quasar sull'orizzonte [deg]
12. Azimuth della quasar [deg]

Sono stati realizzati alcuni controlli per assicurare la correttezza dell'offset in frequenza da applicare al segnale, in modo da evitare errori dovuti all'effetto Doppler. In partenza, è stato confermato il corretto funzionamento delle routines di SPICE, utilizzate nella classe Python *utils_doppler*, per il calcolo delle effemeridi del satellite. Attraverso la funzione di Spiceypy, *azlcpo*, sono stati ricavati gli angoli di Azimuth ed Elevation di GAIA, a partire dalle coordinate delle stazioni e dall'ID del target. Prima di chiamare la funzione, è stato convertito il sistema di riferimento, relativo alle coordinate della stazione, dal sistema di riferimento celeste J2000 a quello terrestre ITRF93, la versione di ITRF2014 presente nei kernels importati. Successivamente, sono stati confrontati i valori degli angoli estratti dal metodo creato con quelli presenti negli FD files, ottenendo lo stesso risultato.

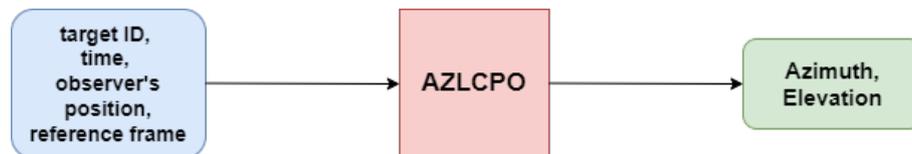


Figura 3.6: Rappresentazione schematica degli input e output di interesse della funzione *azlcpo* di Spiceypy.

Gli angoli ricavati (azimuth ed elevazione) sono stati inseriti in un grafico che mostra i valori relativi allo spacecraft (Figura 3.7), calcolati con *utils_doppler* (in rosso) o estratti dagli FD files (in verde), accostandoli a quelli relativi alla quasar, ottenuti dagli FD files (in blu).

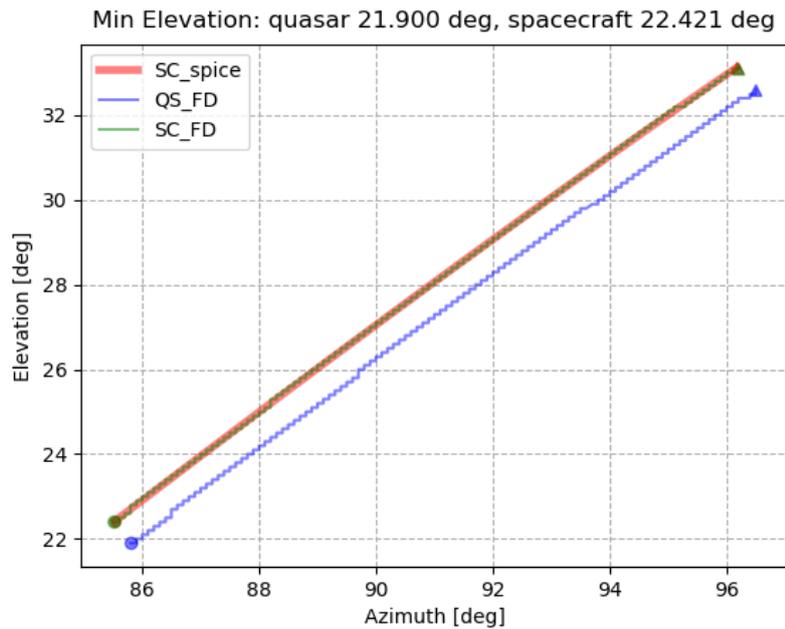


Figura 3.7: Azimuth ed Elevation di spacecraft e quasar estratti dagli FD files o ricavati dalle routines di SPICE. Il cerchio rappresenta il primo di tali valori in ordine temporale, il triangolo l'ultimo.

È stata sviluppata una funzione capace di ricavare azimuth ed elevazione a partire dall'istante di tempo considerato, dal *range*, ossia la distanza del satellite dalla stazione, dalle coordinate dell'osservatore e dal sistema di riferimento. La funzione, chiamata *recpos2AZEL*, è stata sfruttata per ottenere gli angoli relativi allo spacecraft a partire dal *range* presente negli FD files e dalle coordinate cartesiane della stazione contenute nei files SCHED. Gli angoli in output si sono rivelati coincidenti con quelli all'interno degli FD files. Anche in questo caso, viene mostrato un grafico con i risultati, che coincidono in entrambe le analisi: la figura è identica alla precedente (figura 3.7), confermando così il funzionamento dei metodi.

Infine, sono state combinate informazioni estratte sia da SPICE che dagli FD files, attraverso una rappresentazione vettoriale della proiezione della *baseline* lungo la direzione della quasar. Dai files SCHED, sono state individuate le posizioni delle stazioni di Medicina e Noto rispetto al centro della Terra, scelto come origine del sistema di riferimento. Il segmento che congiunge il ricevitore di Medicina a quello di Noto costituisce la *baseline*. La direzione della quasar rispetto alla Terra è costituita dall'output di una funzione di *Astropy*, *SkyCoord*, la quale ricava il versore direzione della sorgente radio in coordinate cartesiane, partendo dai valori di declinazione (DEC) ed ascensione retta (RA) di quest'ultima. Per la quasar in analisi, i valori sono i seguenti: $RA = 77.510^\circ$ e $DEC = 18.011^\circ$. Moltiplicando scalarmente la *baseline* \vec{B} per la direzione della quasar $\vec{Q}S_{direction}$ e dividendo per le norme dei due vettori, si ottiene il coseno dell'angolo tra essi compreso,

come mostrato in equazione 3.9.

$$\cos \theta = \frac{\vec{B} \cdot \vec{QS}_{direction}}{\|\vec{B}\| \|\vec{QS}_{direction}\|} \quad (3.9)$$

La proiezione della *baseline* nella direzione della quasar è semplicemente data dal prodotto di \vec{B} per il coseno dell'angolo.

$$\overrightarrow{projection} = \vec{B} \cos \theta \quad (3.10)$$

La rappresentazione vettoriale di tale calcolo risulta coerente con le previsioni e fornisce un'ulteriore conferma dell'attendibilità dei risultati ottenuti tramite la classe *utils_doppler*: i versori verdi in figura 3.8 indicano la direzione della quasar, il vettore giallo costituisce la *baseline*, di cui il vettore rosso indica la proiezione sulla direzione della quasar, mentre quelli magenta e blu mostrano le distanze dei ricevitori dal centro della Terra, il quale viene preso come origine del sistema di riferimento cartesiano.

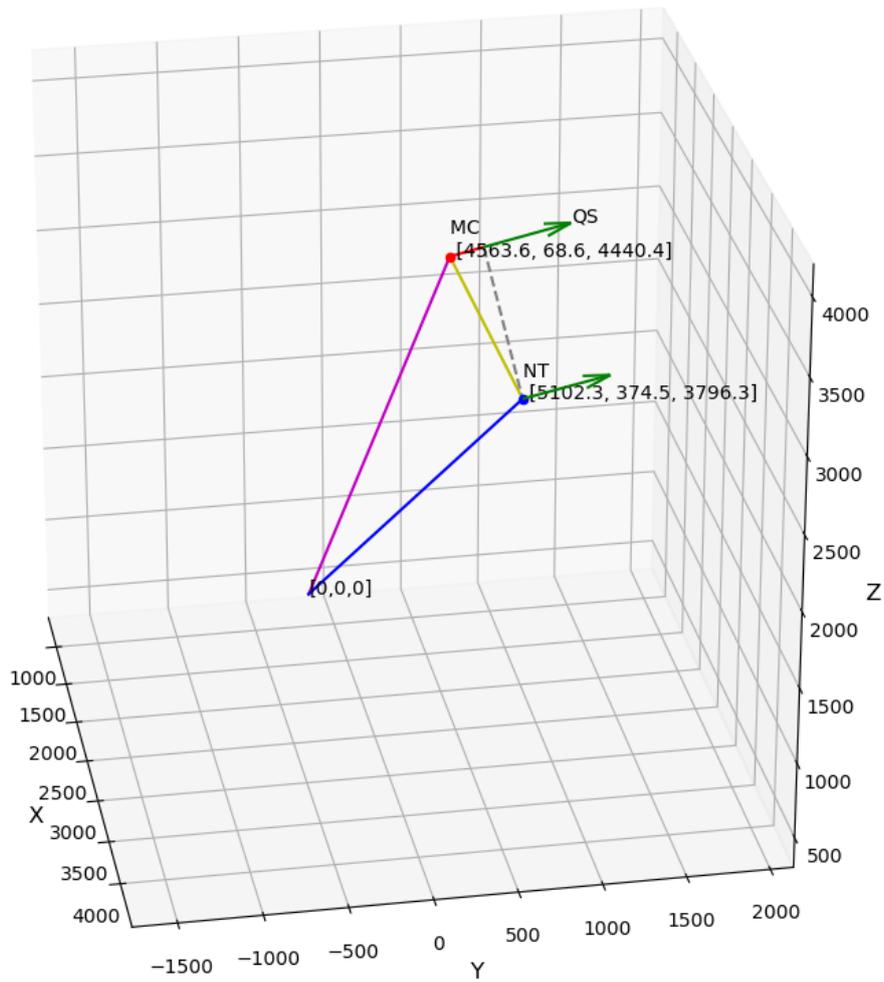


Figura 3.8: Proiezione della *baseline* (vettore rosso) lungo la direzione della quasar (versori verdi).

Dunque, è stata confermata la correttezza del metodo applicato da SPICE per calcolare l'offset in frequenza da applicare al segnale in arrivo. Tuttavia, i dati effettivamente utilizzati per ottenere le osservabili della misurazione Delta-DOR sono contenuti negli FD files forniti dai membri del Flight Dynamics team di ESA, e inseriti nell'apposito correlatore Delta-DOR, che ha restituito il valore di ritardo temporale computato dal modello matematico, confermando ulteriormente le misure precedentemente descritte.

Capitolo 4

Risultati

Il correlatore, sviluppato da un progetto ESA, è stato utilizzato per un'analisi del segnale relativo a quasar e spacecraft, dove i valori estratti dalla correlazione quasar forniscono la correzione necessaria per stimare l'effettiva posizione della sonda nello spazio. Il correlatore ESA si serve delle informazioni contenute negli FD files per ricavare i risultati richiesti.

In un caso di correlazione standard, è sottinteso l'utilizzo di antenne ad alto guadagno appartenenti alla rete ESA per il Deep Space tracking; quando viene attuata una correlazione di tipo VLBI, come nell'analisi di questo studio, il processo si differenzia dal caso standard.

- **Correlazione standard:** è restituito un residuo DOR relativo alla quasar, contenente un valore di *clock offset* (dovuto alla mancanza di sincronizzazione degli orologi posti nei ricevitori di terra, agli effetti dell'atmosfera interposta tra spacecraft e antenne e ad altri fattori) e un residuo DOR relativo allo spacecraft, all'interno del quale viene sommato il ritardo dovuto alla dinamica della sonda a un valore di *clock offset*, causato dai fattori precedentemente descritti. In questa tipologia di correlazione, i ricevitori presenti alle stazioni di terra hanno le fasi iniziali degli oscillatori uguali fra i vari canali. Per cui, gli outputs dell'analisi sono costituiti da un'osservabile DOR contenente il *clock offset*, che, sottratto al residuo DOR spacecraft, fornisce il DOR finale puro. Tale valore deve essere inserito nel software di determinazione orbitale per completare il processo di misurazione Delta-DOR. Si può notare che, in queste condizioni, il *clock offset* relativo alla quasar viene fatto coincidere per ipotesi (a meno di piccoli errori dovuti alla stima a partire dalla quasar) con quello dello spacecraft.
- **Correlazione VLBI:** il correlatore estrae le fasi relative al segnale quasar. L'ipotesi che stabilisce l'uguaglianza tra le fasi iniziali all'interno di ogni canale non è più valida, perciò è necessario considerare una fase iniziale del segnale diversa per ciascun

canale di registrazione. Attraverso un'interpolazione, viene ricavata la fase finale nel tempo centrale dell'intervallo di acquisizione. Si assume che la fase iniziale relativa allo spacecraft coincida con quella della quasar (nonostante esse differiscano tra i vari canali). La determinazione del *clock offset* per l'osservabile DOR della sonda avviene sottraendo le fasi iniziali quasar dalle fasi iniziali spacecraft. Di conseguenza, il *clock offset* risultante è nullo. L'osservabile DOR finale dello spacecraft, ottenuta attraverso una correlazione di tipo VLBI, coincide, dunque, con il residuo dovuto alla correzione dell'errore troposferico e agli errori relativi al modello dinamico.

Il correlatore ha restituito, come output, le osservabili DOR necessarie per la determinazione orbitale e la verifica della bontà della tecnica. Il tempo di integrazione scelto per correlare il segnale della quasar (in questo caso 64 s) definisce il numero di osservabili che possono essere estratte nell'intervallo di tempo disponibile nella registrazione e ogni intervallo è processato indipendentemente dagli altri. In particolare, la correlazione dei dati di 3 registrazioni (SC-QS-SC) del giorno 22 dicembre 2020 ha fornito 8 valori di osservabili DOR quasar e 12 osservabili DOR (considerando invece 20 s) per ogni registrazione spacecraft (di cui viene fornita sia la versione calibrata tramite quasar, che il valore non calibrato). Tramite la differenza tra le osservabili misurate e quelle *a priori*, calcolate a partire dal modello dinamico, vengono estratti i valori di *clock offset*, mostrati in figura 4.1.

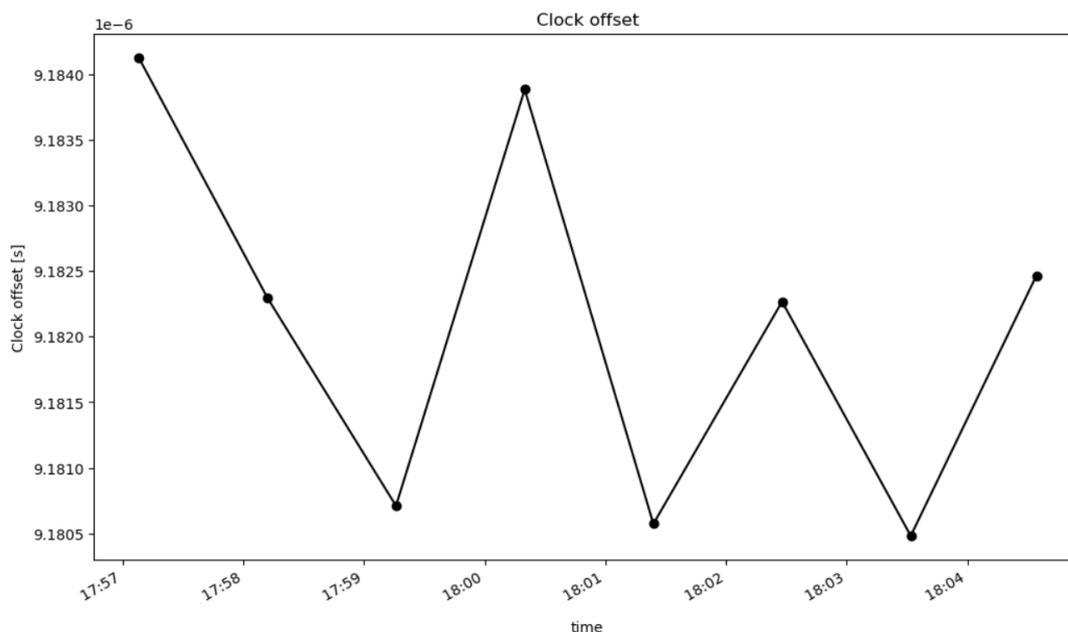


Figura 4.1: Andamento del *clock offset* nel tempo, estratto dalle misure quasar tramite il correlatore (impostato a partire dagli FD files forniti dal team di Flight Dynamics di ESA).

All'interno del diagramma in figura 4.2 sono mostrate le osservabili relative all'ultima sequenza di registrazione SC-QS-SC (i tre blocchi in figura, si vedano le tabelle 2.5 e 2.7 per riferimento ai rispettivi intervalli temporali):

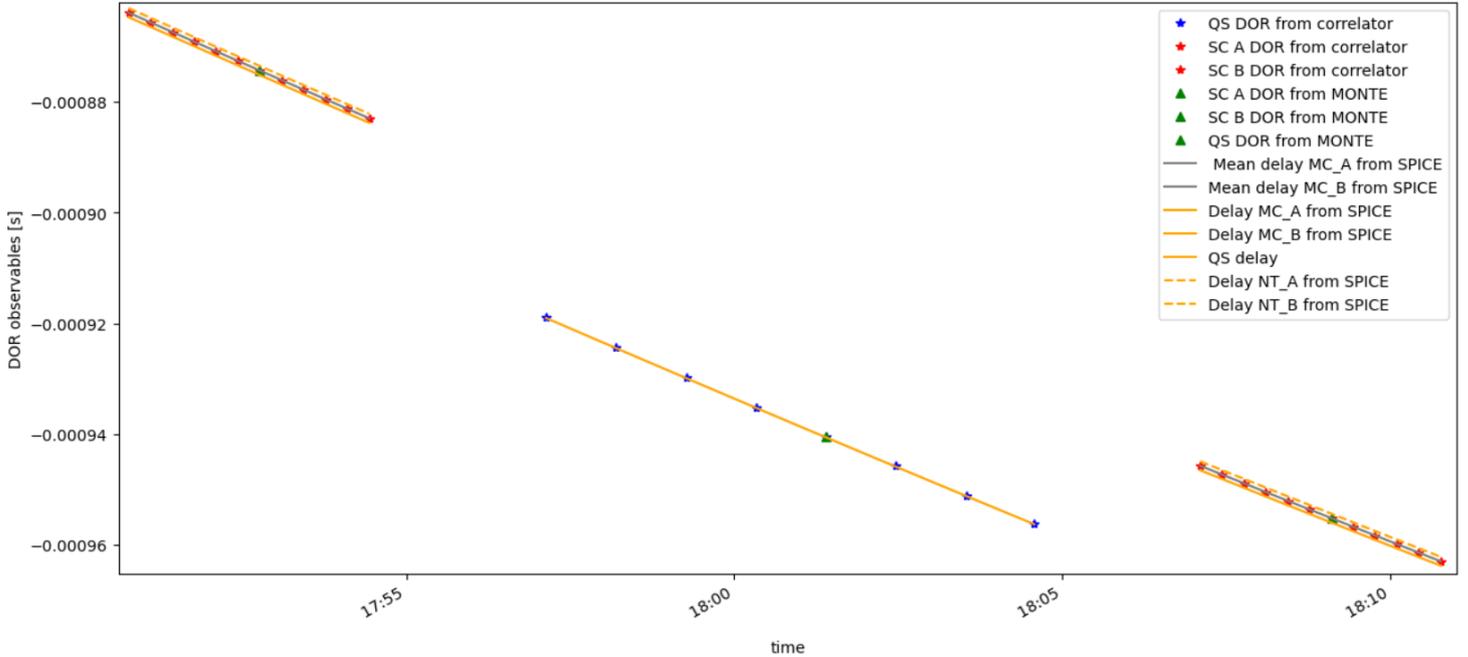


Figura 4.2: Confronto tra le osservabili DOR provenienti dal correlatore, con input dato dai files di FD, dalle routines di SPICE e dal software MONTE. Gli ultimi due metodi sono basati sui kernels pubblici di missione.

Utilizzando gli FD files di ESA come input, si sono confrontati i valori estratti dal correlatore con quelli relativi alle stesse osservabili DOR, ricavati attraverso le routines di SPICE (a partire dai kernels di missione, più aggiornati rispetto agli FD files). Analogamente, i valori provenienti dall'output di correlazione sono stati confrontati con le osservabili "computed", calcolate dal modello dinamico definito attraverso il software MONTE di NASA, ovvero i valori attesi dell'osservabile a partire dalle condizioni iniziali estratte dagli SPICE kernels. Si notano i seguenti risultati:

- Stelle rosse e blu - valori di osservabili di spacecraft (rosso) e quasar (blu) ottenuti dalla correlazione basata sulle informazioni contenute negli FD files; indicano le osservabili misurate.
- Linee arancioni - valori di osservabili ricavate attraverso le routines di SPICE tramite la classe Python *utils_doppler*, a partire dai kernels di missione. La linea tratteggiata indica i parametri relativi alla stazione di Noto, mentre la linea continua rappresenta quelli riferiti al ricevitore di Medicina.

- Triangoli verdi - osservabili ottenute a partire dai kernels di missione, "computed" dal modello dinamico con il software MONTE.
- Linea grigia - risultato restituito dalla classe `utils_doppler`, ipotizzando come direzione di riferimento del segnale in arrivo un valore intermedio tra quello che sarebbe veramente osservato alle due stazioni di terra; ovvero utilizzando la direzione intermedia tra ogni stazione di terra e la posizione dello spacecraft.

Per riscontrare differenze apprezzabili sul valore di ritardo stimato, in un caso considerando la direzione vera ad ogni stazione, nell'altro caso un valore intermedio per entrambe le stazioni, viene mostrato in figura 4.3 un ingrandimento della 4.2.

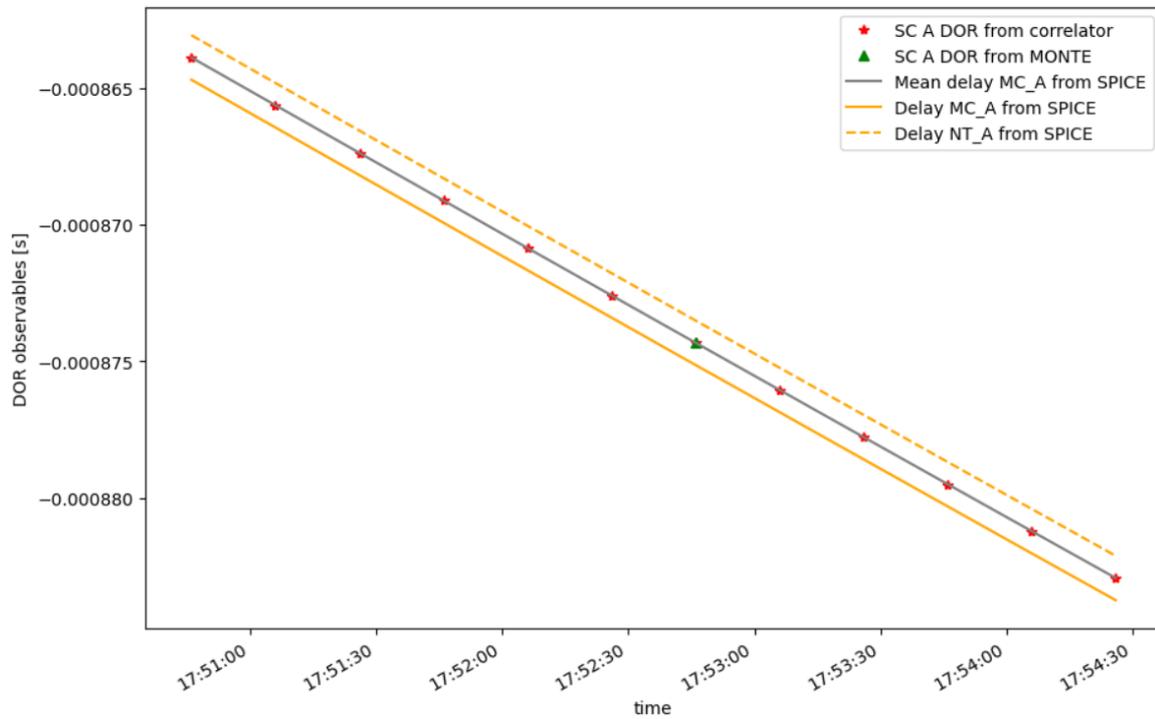


Figura 4.3: Particolare delle osservabili DOR della prima acquisizione del segnale spacecraft, estratte attraverso i tre metodi: correlatore (FD files), SPICE e MONTE.

La parte di osservabile DOR derivata dal modello dinamico conosciuto *a priori*, rappresenta il ritardo geometrico del segnale in arrivo alle due stazioni, e può essere ottenuto proiettando la *baseline* (moltiplicata per la velocità della luce) lungo la direzione descritta dai vettori che collegano il ricevitore considerato allo spacecraft. Per definire una direzione di riferimento unica per entrambe le stazioni (r in figura 4.4) rispetto alla quale calcolare il ritardo atteso sul segnale, si può utilizzare un valore intermedio fra i vettori che congiungono le singole stazioni a terra con lo spacecraft:

$$r = \frac{r_{MC} - r_{NT}}{2} \quad (4.1)$$

dove r_{MC} indica il vettore che congiunge il target alla stazione di Medicina e r_{NT} al ricevitore di Noto.

Considerando i valori in arancione in figura 4.3 (relativi alla direzione vera, formata dal vettore stazione-spacecraft) e i valori in grigio (relativi alla direzione unica intermedia, ottenuta dall'equazione 4.1), è stato dedotto che il modello matematico, di cui si serve il correlatore, applica la direzione intermedia per la sonda GAIA. Infatti, il segmento di colore grigio, mostrato in figura 4.3 si avvicina di più ai valori delle stelle rosse, le quali rappresentano gli outputs del correlatore, mentre i segmenti arancioni indicano le osservabili DOR, ottenute attraverso le routines di SPICE, ricavate tramite un metodo che individua la direzione specifica per ogni ricevitore (Noto - linea tratteggiata, Medicina - linea continua).

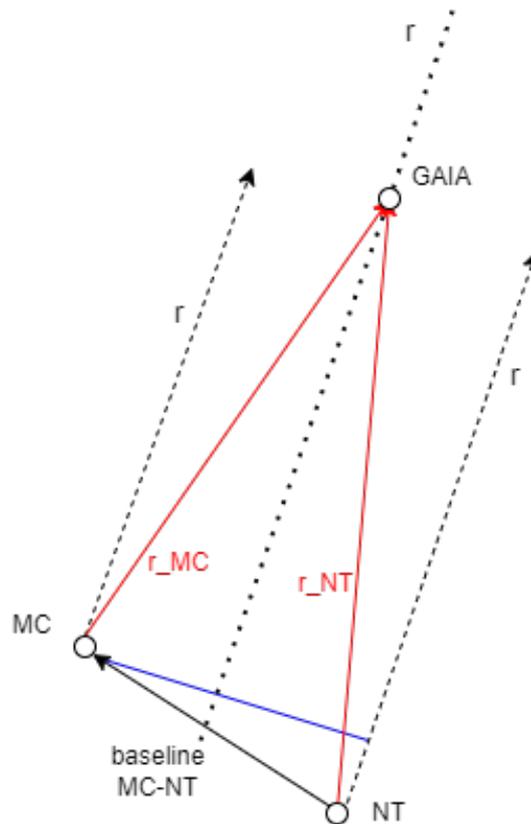


Figura 4.4: Direzione di riferimento intermedia r , utilizzata dal correlatore.

La fase finale di questo studio è legata al confronto dei risultati reali, misurati dal correlatore, con i valori stimati dal modello dinamico che descrive l'ambiente considerato. Per realizzare tale confronto, viene effettuata un'operazione di *passthrough*, dove vengono calcolati i residui tra le misure vere e i valori attesi, senza stimare alcun parametro del sistema. Il risultato rappresenta un mezzo di discernimento per confermare o meno la fattibilità di una rilevazione Delta-DOR, sfruttando un complesso di sole antenne VLBI.

Per effettuare tale analisi, è stato utilizzato il software MONTE, fornito da NASA: si tratta di un'estensione di Python, sviluppata dalla sezione di design di missione e navigazione del Jet Propulsion Laboratory (JPL), che permette, fra le altre possibilità, di ricavare le effemeridi di un corpo nello spazio, grazie a informazioni e modelli preimpostati nel database. Partendo da un insieme conoscenze *a priori*, provviste di un certo grado di incertezza, MONTE è in grado di costruire un modello matematico relativo al fenomeno studiato attraverso un processo iterativo che prevede la correzione dei parametri del setup iniziale, tramite l'inserimento di osservabili misurate. Un filtro di stima, implementato all'interno del programma, ottiene i parametri aggiornati del setup creato *a priori* per mezzo delle osservabili misurate, fornite in input. Durante le varie iterazioni, vengono ricavati e ridotti i residui, finché le oscillazioni di questi ultimi non si mantengono al di sotto di una certa soglia, restituendo, nella migliore delle ipotesi, un rumore bianco a media nulla. Il modello aggiornato può essere sfruttato per ricavare anche altri valori di osservabili non misurate. Nel caso in questione, con il passthrough non è stato attuato il processo iterativo per la riduzione dei residui restituiti dal modello matematico, ma sono state create delle osservabili VLBI "computed", che sono state confrontate con i valori di output del correlatore ESA, per ricercare un'effettiva conferma del corretto funzionamento di una misura di tipo Delta-DOR, attuata tramite antenne VLBI.

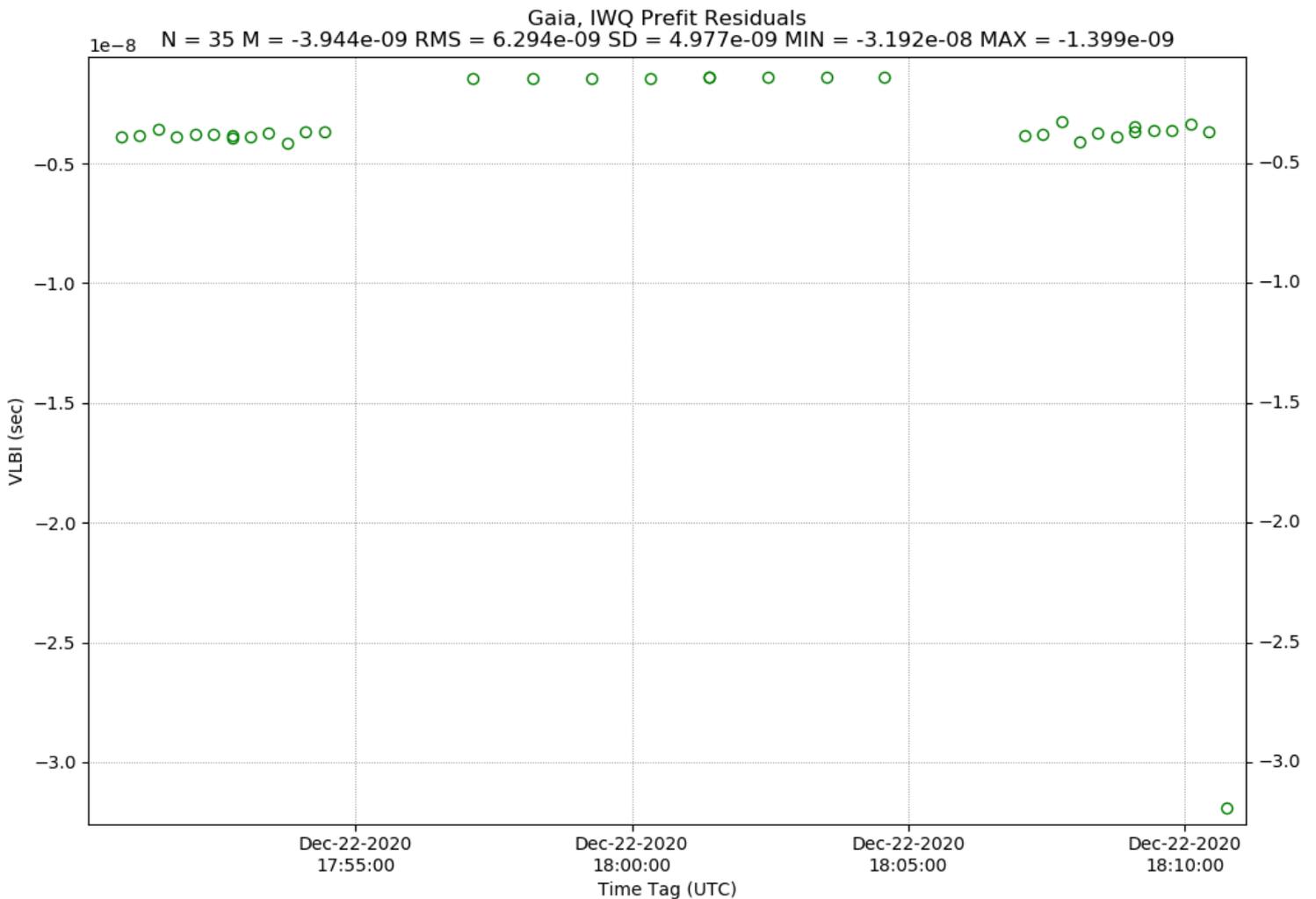
I valori di output del correlatore rappresentano il ritardo temporale ottenuto dalla misurazione VLBI attuata e sono stati inseriti come osservabili DOR all'interno dell'ambiente MONTE, attraverso un oggetto appartenente alla tipologia DOR VLBI, sia per lo spacecraft, che per la quasar.

Le osservabili spacecraft si presentano sfasate rispetto a quelle della quasar e la distanza tra tali valori indica la calibrazione da applicare all'osservabile della sonda, incrementando l'accuratezza della misura. In figura 4.4 si nota che i valori di ordinata delle osservabili quasar non sono poste nello zero del grafico. Se le osservabili in uscita dal correlatore coincidessero esattamente con quelle ottenute attraverso il software di determinazione orbitale, i residui relativi alla quasar dovrebbero fornire un rumore compatibile con il valore 0 s. Si ritiene che il *bias* riscontrato sia dovuto alle differenze presenti nel modello e nei differenti database di input che vengono utilizzati rispettivamente da MONTE e dal correlatore.

Le osservabili DOR, estratte attraverso la correlazione, sono basate sui dati relativi alla geometria del problema contenuti negli FD files; tra tali informazioni, è presente un modello matematico che descrive l'effetto subito dal segnale durante l'attraversamento della troposfera. Nel modello descritto, si ipotizza che temperatura e pressione si mantengano costanti all'interno dello strato inferiore dell'atmosfera terrestre e ciò si traduce in un offset temporale ulteriore nell'arrivo del segnale alle stazioni di terra. Tale effetto risulta non trascurabile a causa del basso angolo di elevazione delle sorgenti radio sull'orizzonte: nelle misurazioni Delta-DOR, infatti, i valori dell'elevazione di spacecraft e quasar ten-

dono a mantenersi moderati, per cui si ha un'elevata quantità di atmosfera interposta tra il target e i ricevitori, che comporta un conseguente ritardo del segnale.

Nel caso del modello dinamico definito nell'ambiente MONTE per la determinazione delle osservabili DOR riferite al satellite di GAIA, non è stato applicato un modello troposferico, poiché non sono noti i parametri utilizzati dai membri del Flight Dynamics team di ESA nella creazione dei files FD. Di conseguenza, tutte le osservabili (sia spacecraft, che quasar) risultano traslate, rispetto allo zero, di una quantità pari a circa 1.44 ns. Come accennato precedentemente, tale sfasamento può essere dovuto anche alla differenza tra i kernels impiegati dai due diversi sistemi di calcolo.



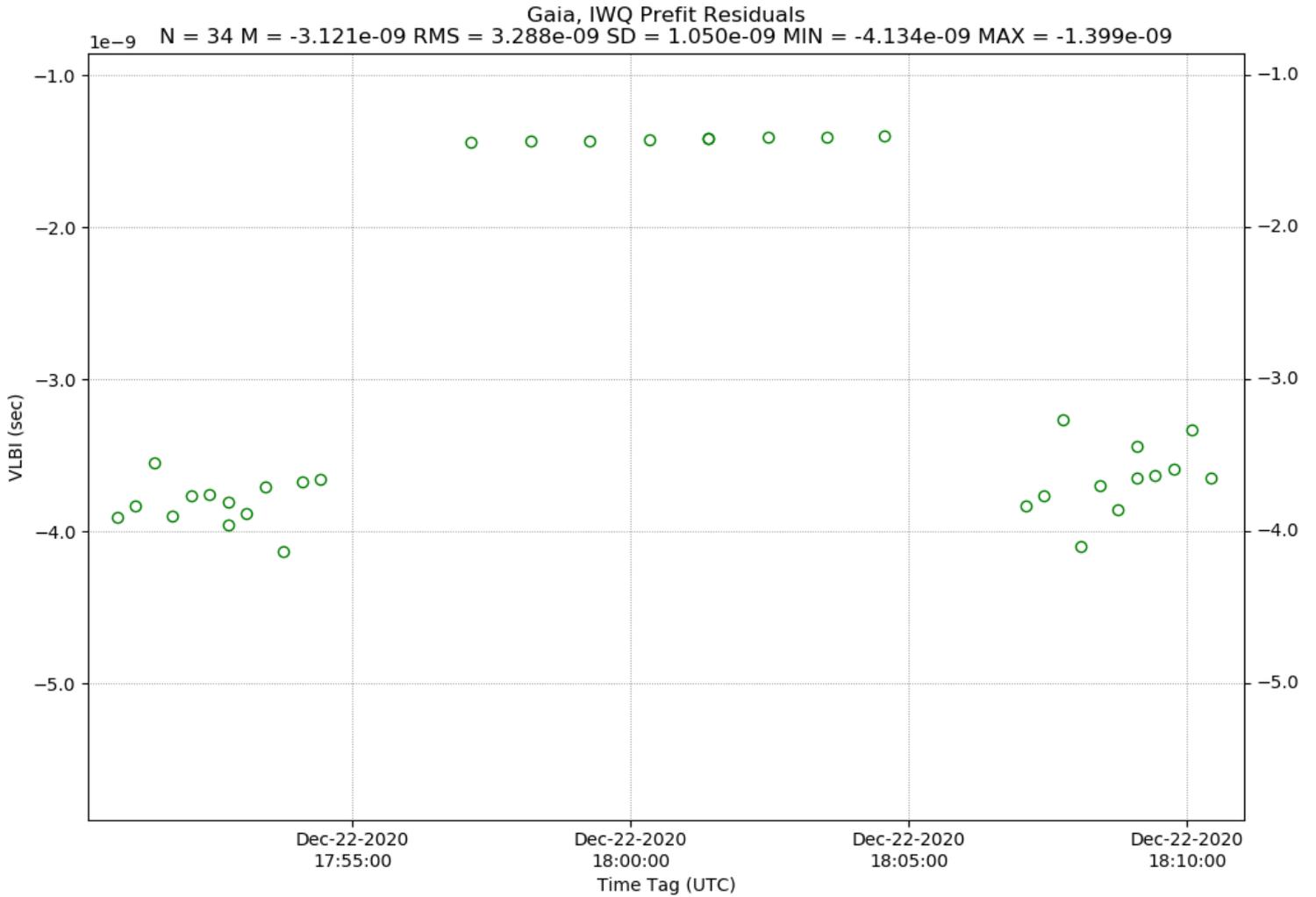


Figura 4.6: Residui DOR ottenuti dall'analisi delle registrazioni VLBI attraverso MONTE, con l'esclusione di un *outlier*.

I risultati ottenuti sono compatibili con le previsioni con un errore dell'ordine di pochi nanosecondi. Le valutazioni eseguite sono promettenti; tuttavia, ulteriori analisi sono necessarie per l'ottenimento di un'effettiva conferma riguardante la fattibilità del tracking di una sonda Deep Space attraverso sole antenne VLBI.

Conclusioni

Negli ultimi anni, l'ambito delle missioni Deep Space è stato caratterizzato da un continuo sviluppo, con un elevato aumento del numero di missioni spaziali. Tuttavia, il numero di stazioni di terra che possono elaborare i segnali trasmessi da questo tipo di sonde è estremamente limitato. Sono richieste, infatti, antenne ad alto guadagno, ricevitori raffreddati criogenicamente e hardware particolari per poter raccogliere i deboli segnali trasmessi da distanze elevate. Di conseguenza, la ricerca di una soluzione alternativa, che favorisse il tracking di sonde Deep Space senza l'appoggio delle reti internazionali di antenne ad alto guadagno gestite da agenzie spaziali, ha portato alla formulazione di un'ipotesi, ovvero la possibilità di realizzare una misurazione radiometrica di tipo Delta-DOR impiegando sole antenne VLBI.

Dopo alcuni risultati preliminari, comprendenti misurazioni raccolte da una stazione ESA in contemporanea ad una stazione VLBI, si è deciso di svolgere una ricerca più approfondita in tale ambito, partendo da registrazioni ottenute solamente da antenne VLBI, in particolare, considerando le stazioni di terra poste a Medicina e Noto.

Il 22 dicembre 2020 è stato acquisito il segnale proveniente dallo spacecraft GAIA e da una quasar, in uno shadow tracking di misurazione Delta-DOR effettuato da ESA. Tali registrazioni sono state analizzate in questa tesi, per estrarne le osservabili DOR e valutarne la qualità.

Dopo alcune fasi di preprocessing dei dati registrati, tra le quali la conversione dei files binari a formati standard per il correlatore ESA, questi dati sono stati forniti al correlatore, insieme alle informazioni geometriche effettuate dal team di Flight Dynamics di ESOC, comprendenti le posizioni relative e i ritardi attesi nella ricezione dei segnali.

Con il correlatore, è stata applicata una correzione in frequenza ai segnali per compensare l'effetto Doppler da essi subito, legato al moto relativo fra le stazioni di Terra, la sonda GAIA e la quasar. Ai segnali quasar è stata applicata la correlazione incrociata, ottenendo le correzioni da applicare al segnale della sonda e sono state ottenute osservabili relative a spacecraft e quasar, costituenti il DOR misurato. Tali risultati sono stati inseriti nel software di determinazione orbitale MONTE, fornito da NASA, permettendo così di ricavare i residui DOR.

I valori finali delle osservabili presentano uno sfasamento rispetto a quelli del DOR a

priori, calcolato a partire dal modello dinamico, e si ritiene essere dovuto alla differenza del modello troposferico sfruttato dai due metodi, dai kernels importati, differenti rispetto alle predizioni del team di Flight Dynamics, e agli effetti legati alla *baseline* non ottimale, impiegata in queste registrazioni.

Uno sviluppo futuro di questa ricerca può essere costituito dalla realizzazione di FD files, creati inserendo un modello troposferico maggiormente accurato, e dal confronto dell'output di correlazione con le osservabili ricavate da MONTE, inserendo il corretto modello troposferico anche all'interno dei calcoli per la determinazione orbitale. Inoltre, l'impiego di una *baseline* di maggiori dimensioni apporterebbe significativi miglioramenti a questo tipo di misurazione. È stato confermato che la tecnica radiometrica del Delta-DOR raggiunge la sua massima precisione nel campo delle acquisizioni di tipo *Wideband*, il cui sviluppo è tuttora in fase di crescita. Perciò, l'applicazione del tracking di un satellite attraverso il W Δ -DOR potrebbe apportare importanti contributi all'ottenimento di una misura precisa ed accurata delle effemeridi di sonde Deep Space anche in ambito di sole antenne VLBI.

Appendice

4.1 Grafici "waterfall" delle registrazioni attuate ai ricevitori di Medicina e Noto il 22 dicembre 2020

Attraverso i grafici "waterfall" vengono mostrate le registrazioni attuate attraverso i canali principali, ossia canale 1,2 e 3, per entrambe le stazioni di terra.

Medicina

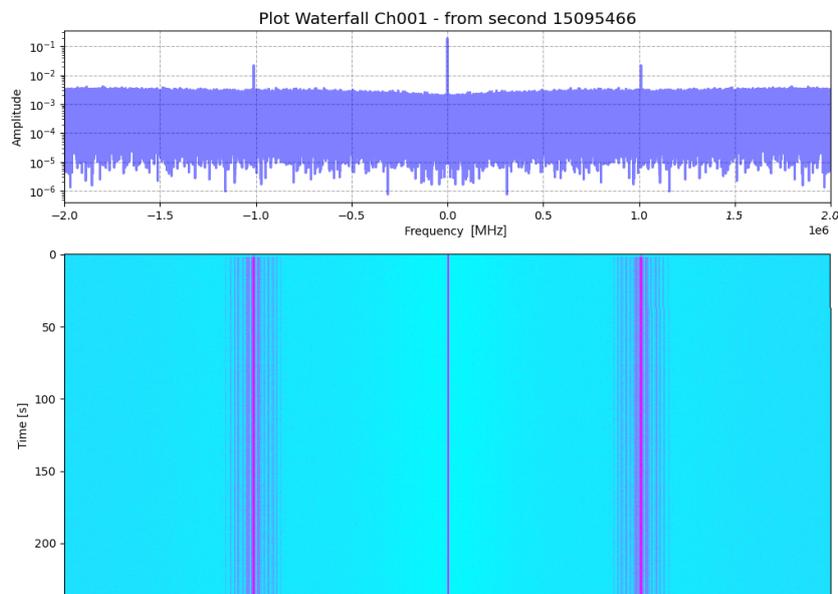


Figura 4.7: Registrazione 1, canale 1.

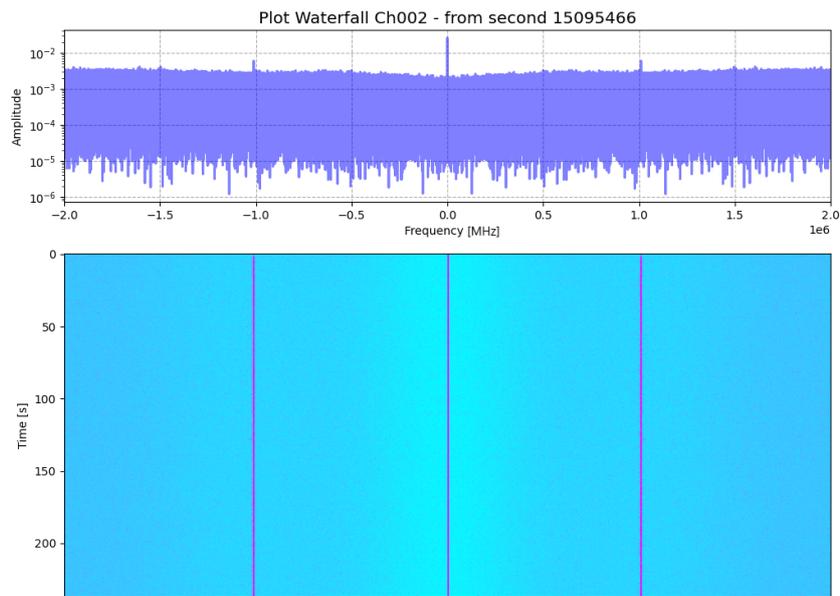


Figura 4.8: Registrazione 1, canale 2.

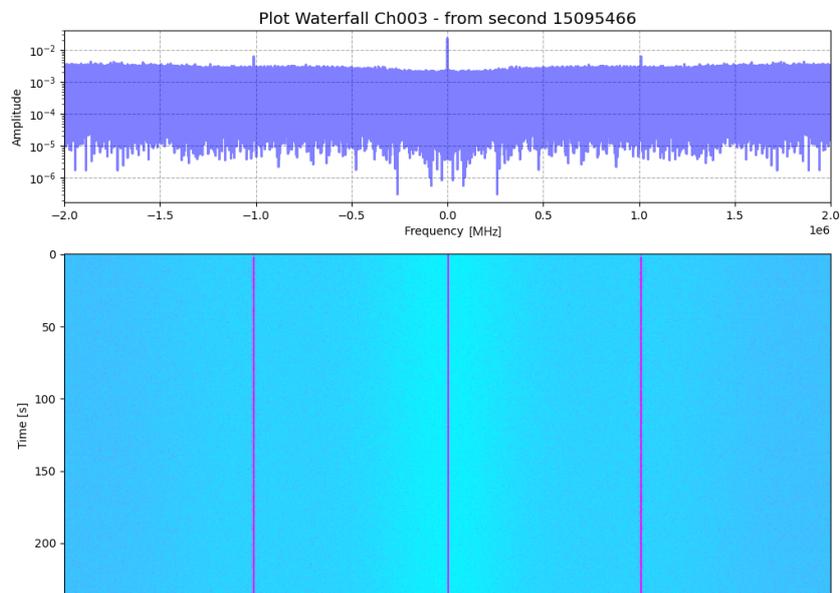


Figura 4.9: Registrazione 1, canale 3.

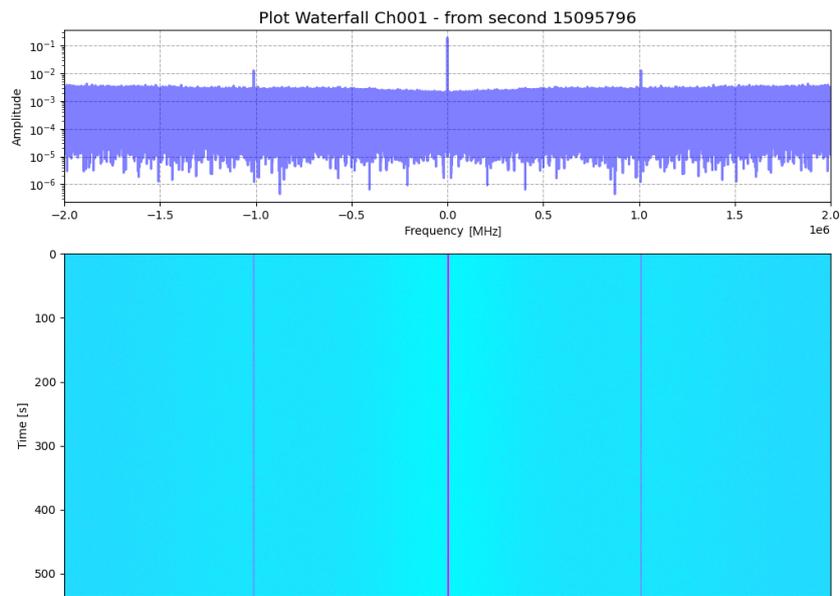


Figura 4.10: Registrazione 2, canale 1.

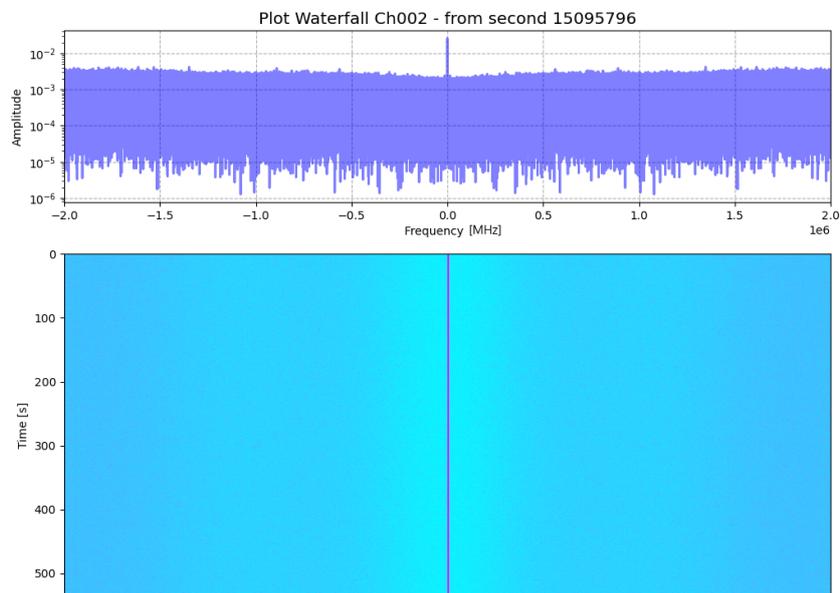


Figura 4.11: Registrazione 2, canale 2.

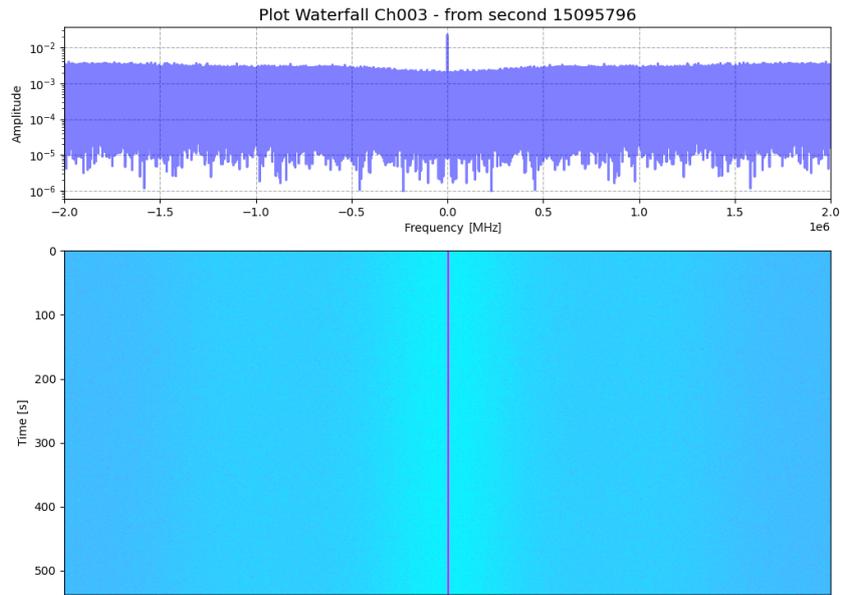


Figura 4.12: Registrazione 2, canale 3.

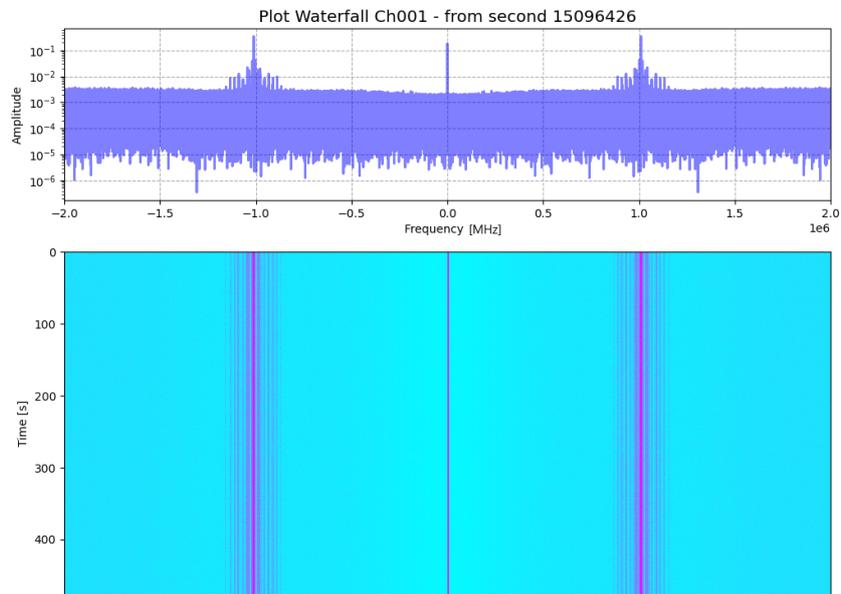


Figura 4.13: Registrazione 3, canale 1.

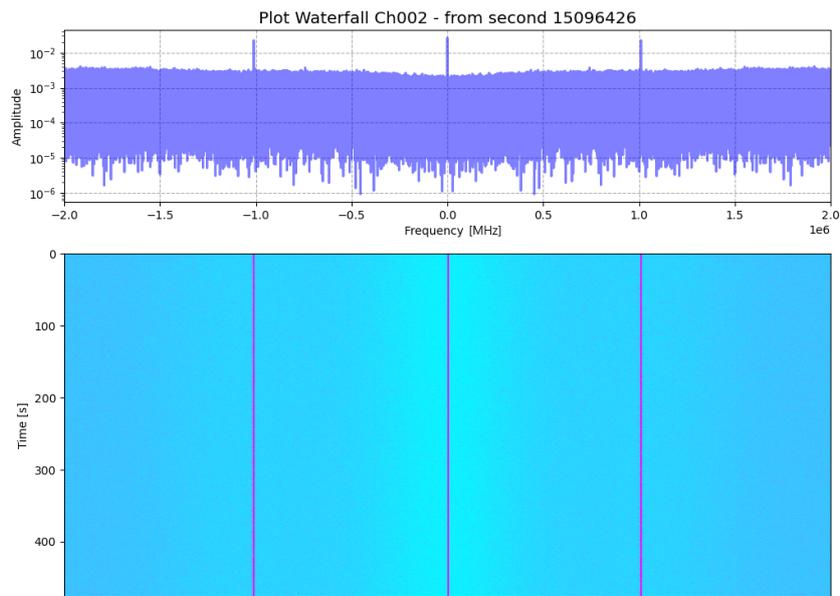


Figura 4.14: Registrazione 3, canale 2.

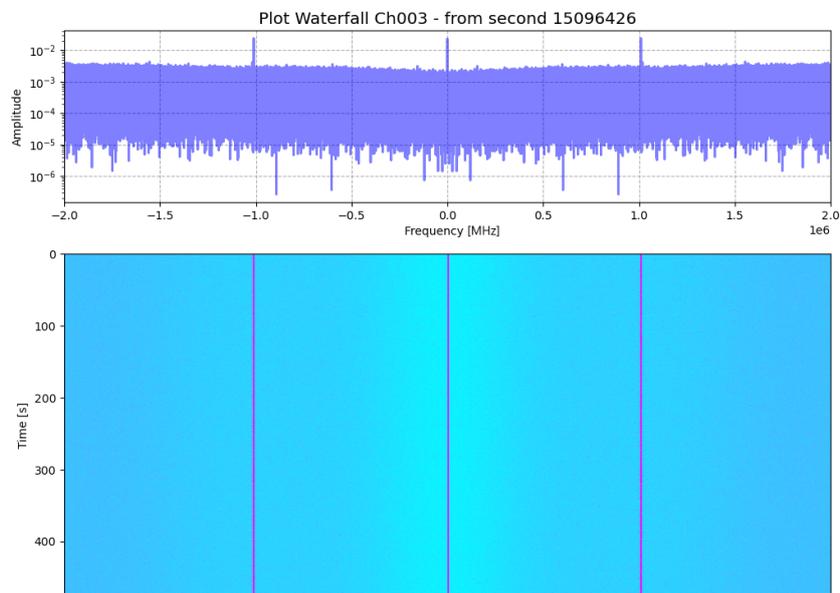


Figura 4.15: Registrazione 3, canale 3.

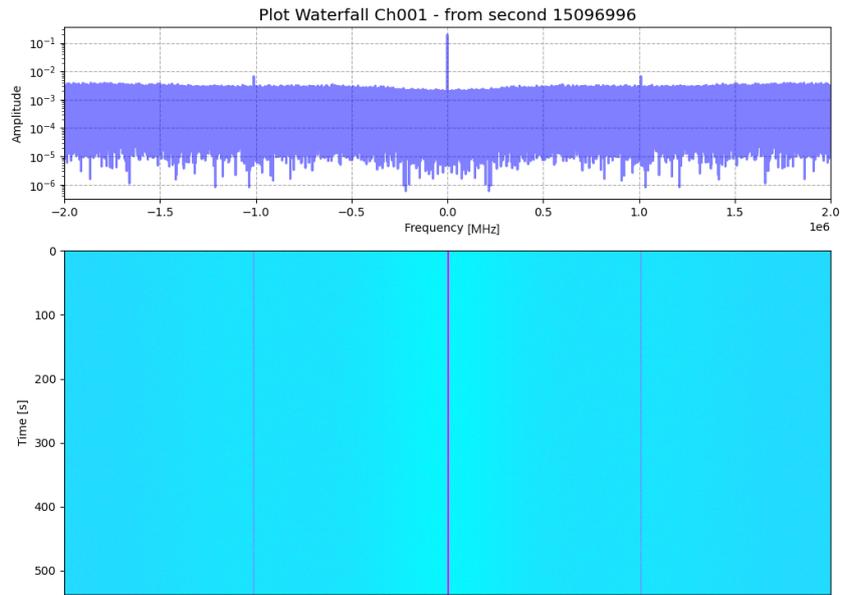


Figura 4.16: Registrazione 4, canale 1.

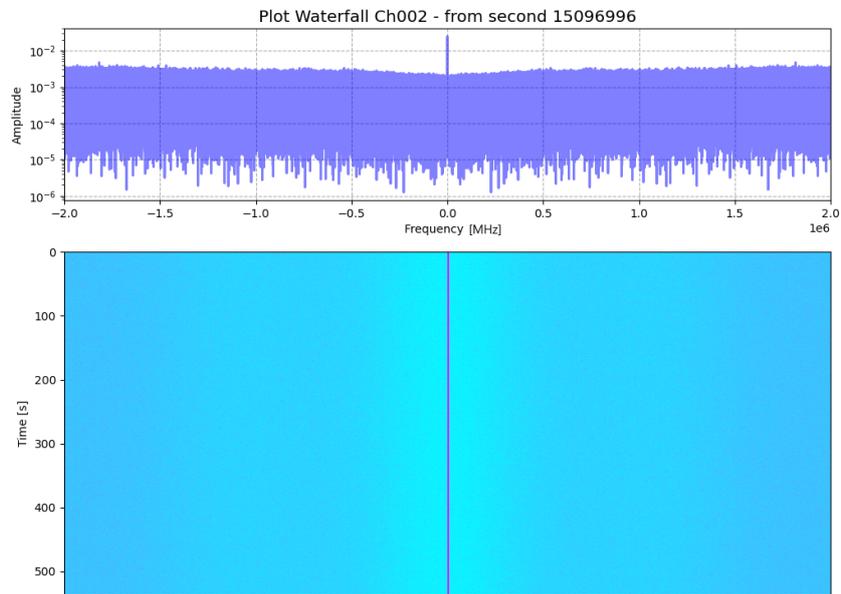


Figura 4.17: Registrazione 4, canale 2.

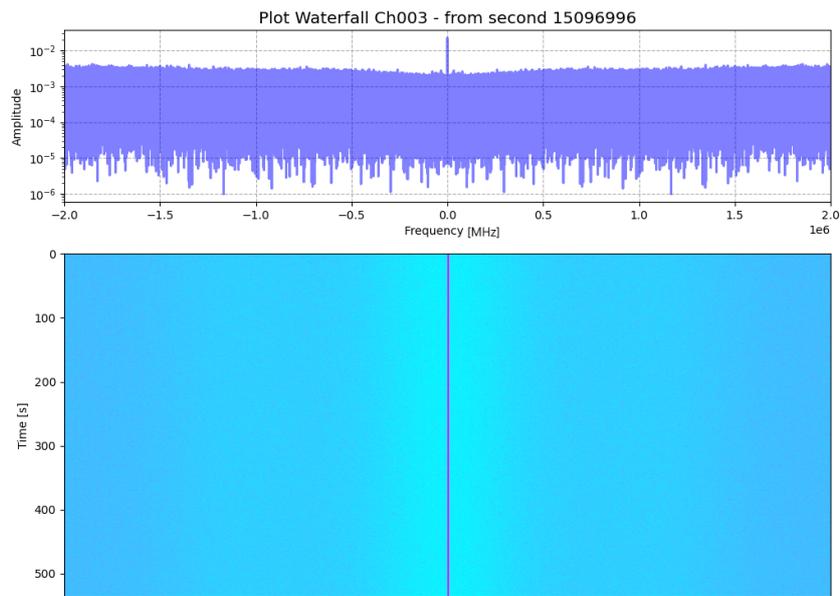


Figura 4.18: Registrazione 4, canale 3.

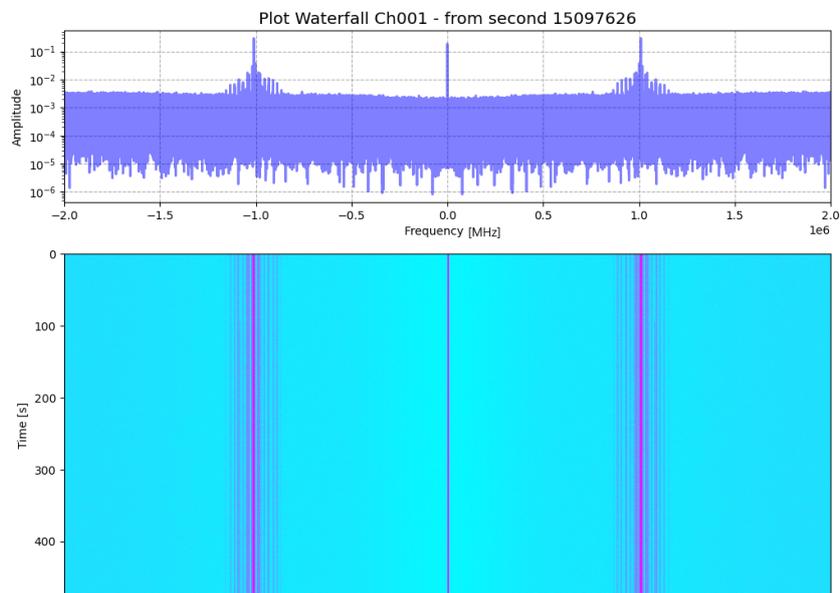


Figura 4.19: Registrazione 5, canale 1.

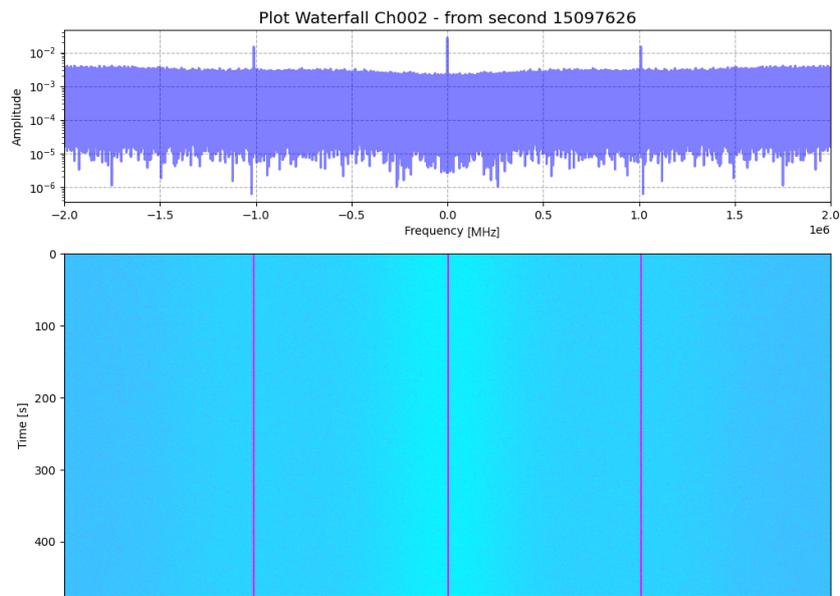


Figura 4.20: Registrazione 5, canale 2.

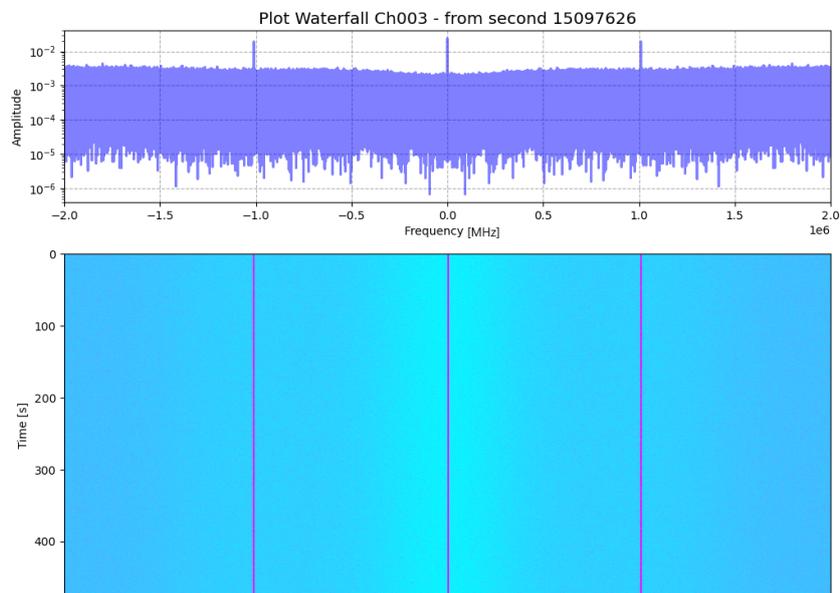


Figura 4.21: Registrazione 5, canale 3.

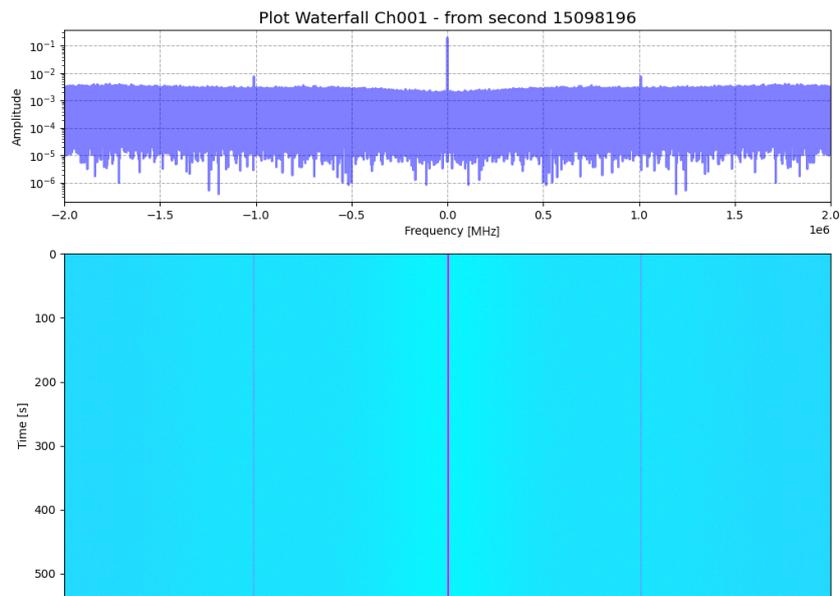


Figura 4.22: Registrazione 6, canale 1.

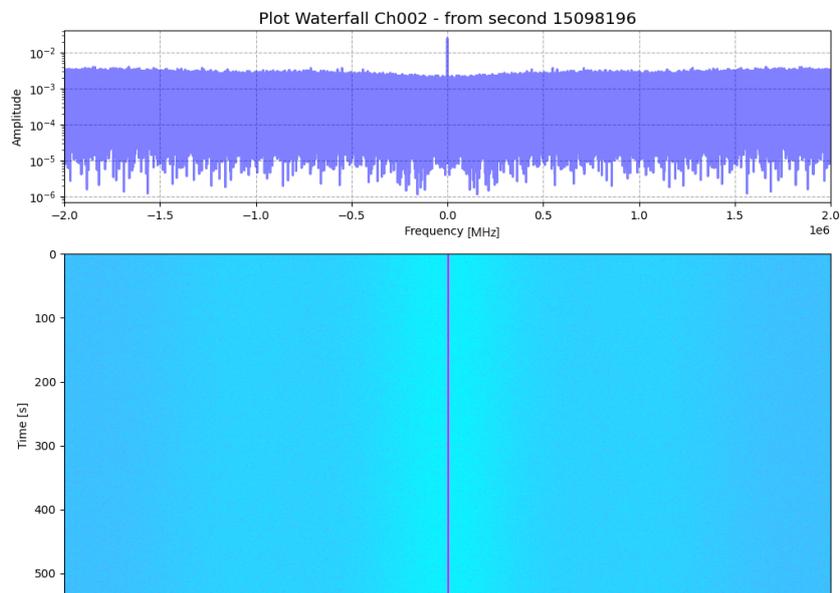


Figura 4.23: Registrazione 6, canale 2.

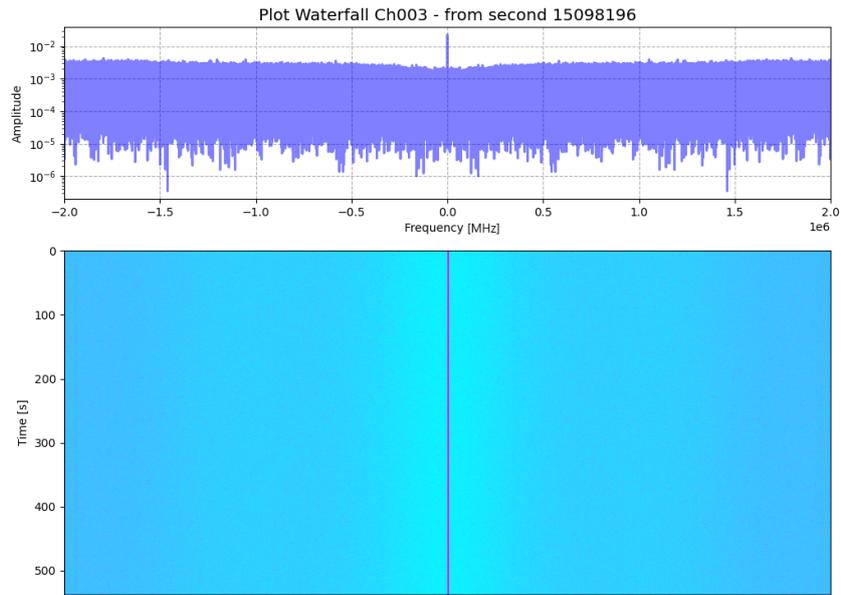


Figura 4.24: Registrazione 6, canale 3.

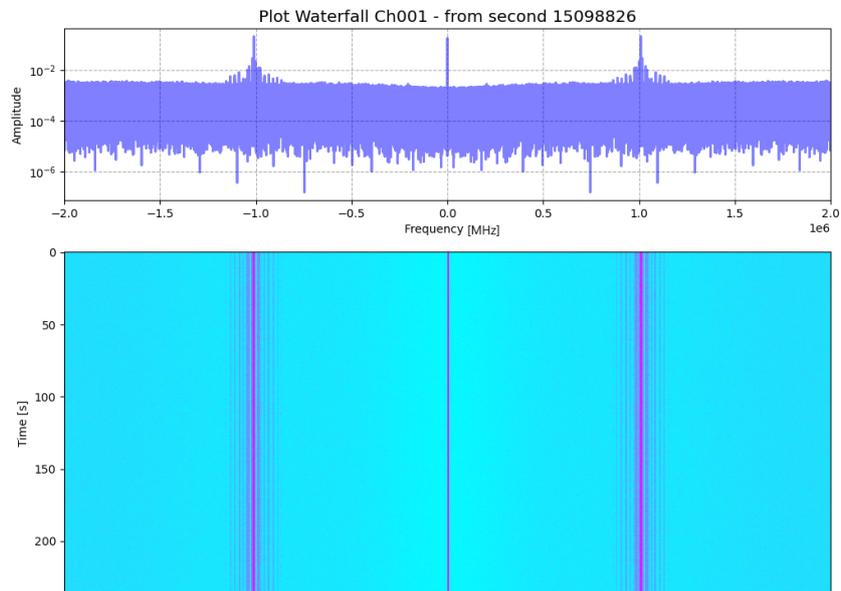


Figura 4.25: Registrazione 7, canale 1.

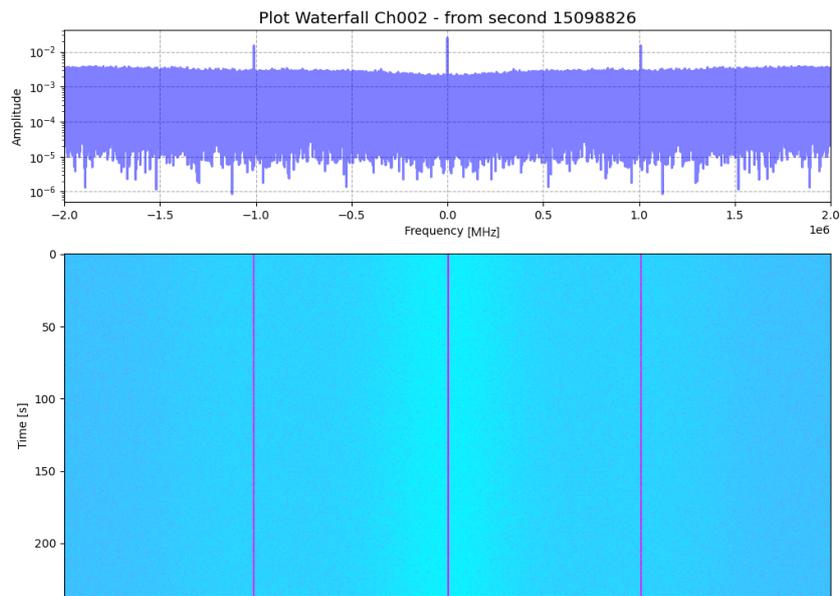


Figura 4.26: Registrazione 7, canale 2.

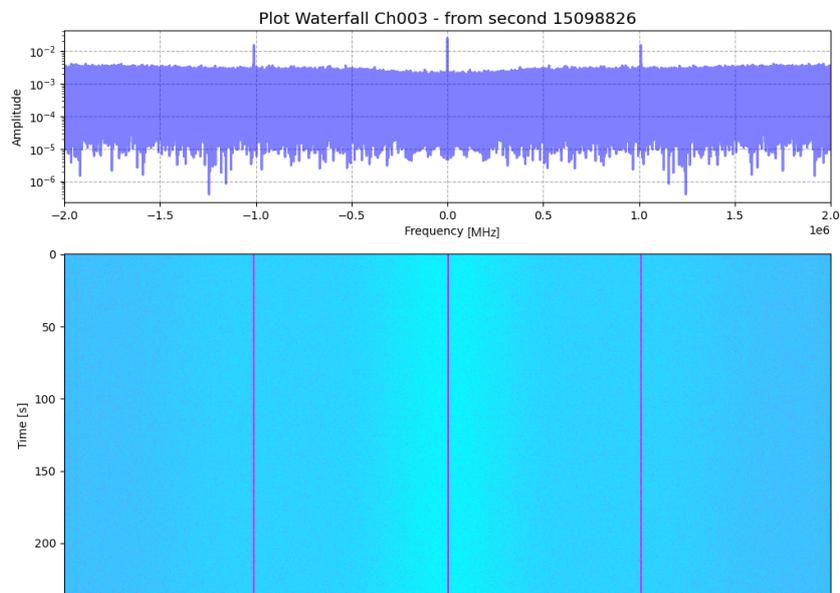


Figura 4.27: Registrazione 7, canale 3.

Nota

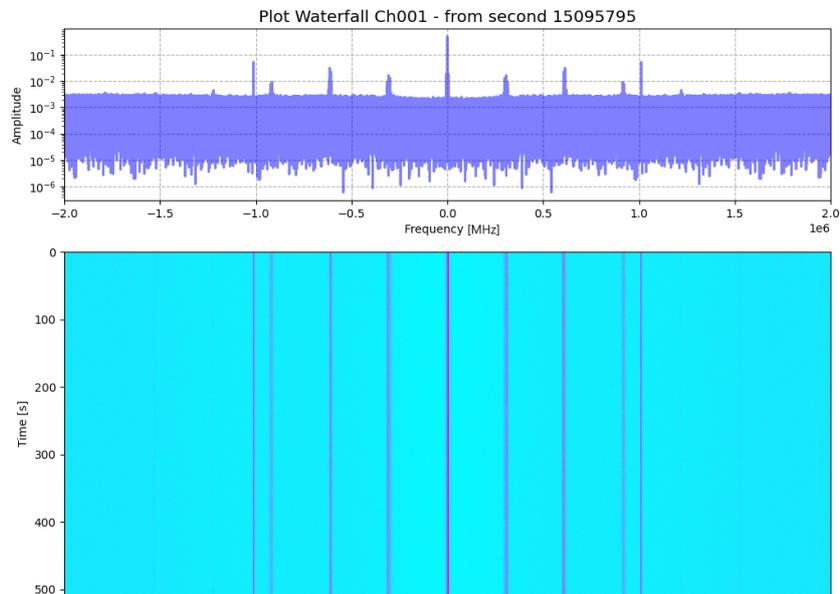


Figura 4.28: Registrazione 2, canale 1.

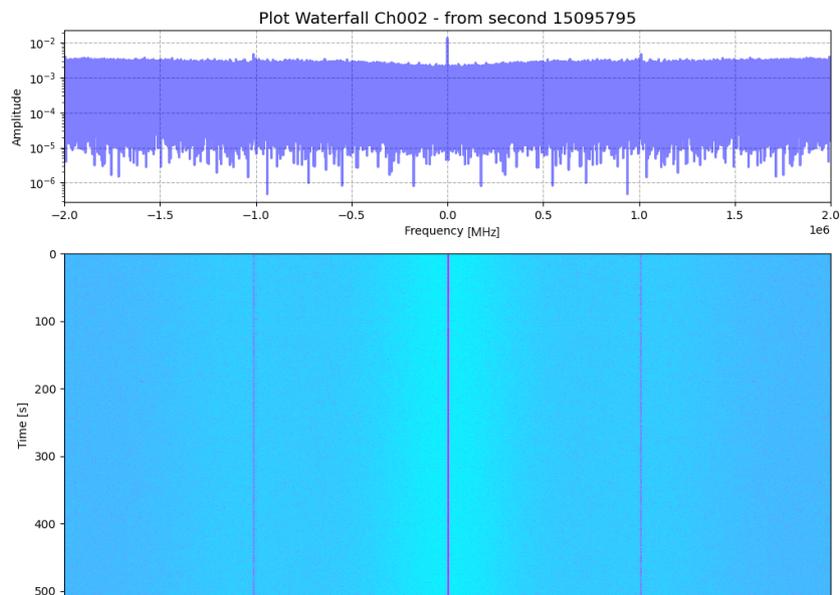


Figura 4.29: Registrazione 2, canale 2.

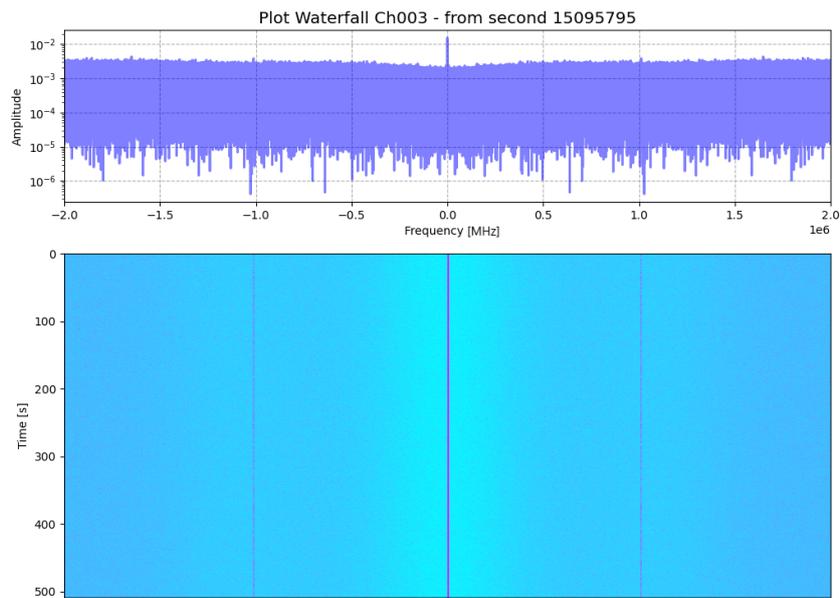


Figura 4.30: Registrazione 2, canale 3.

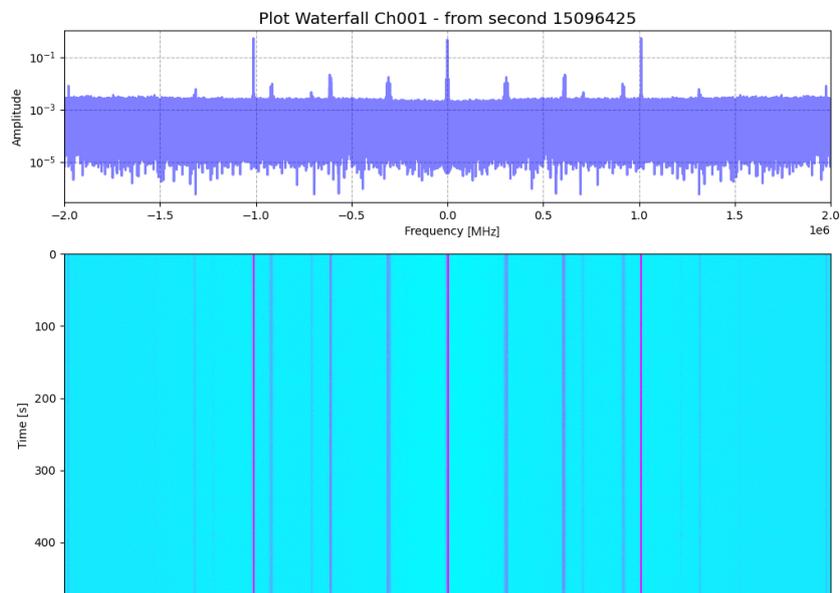


Figura 4.31: Registrazione 3, canale 1.

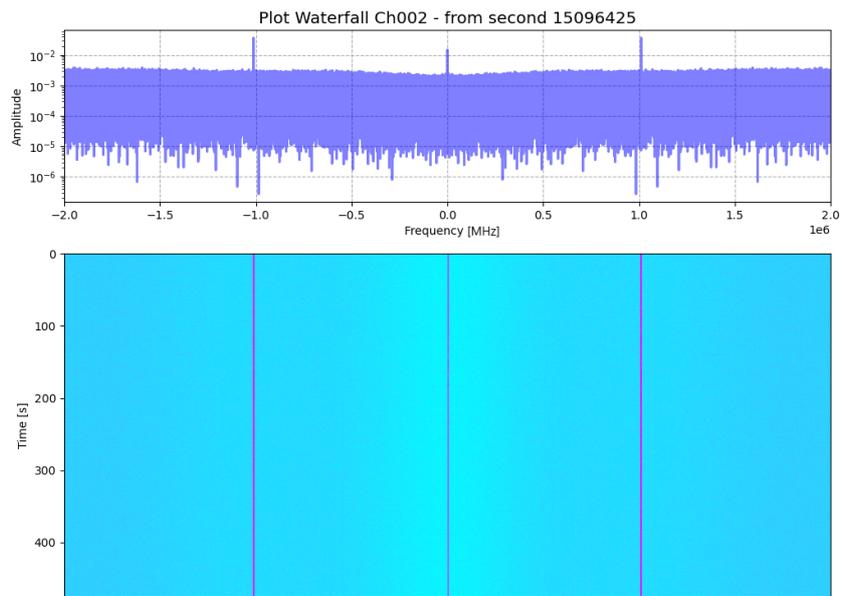


Figura 4.32: Registrazione 3, canale 2.

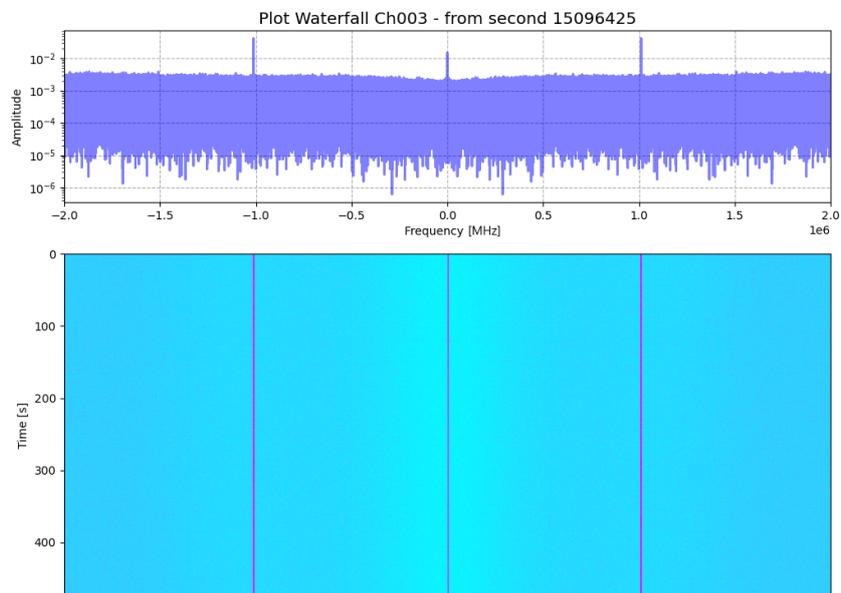


Figura 4.33: Registrazione 3, canale 3.

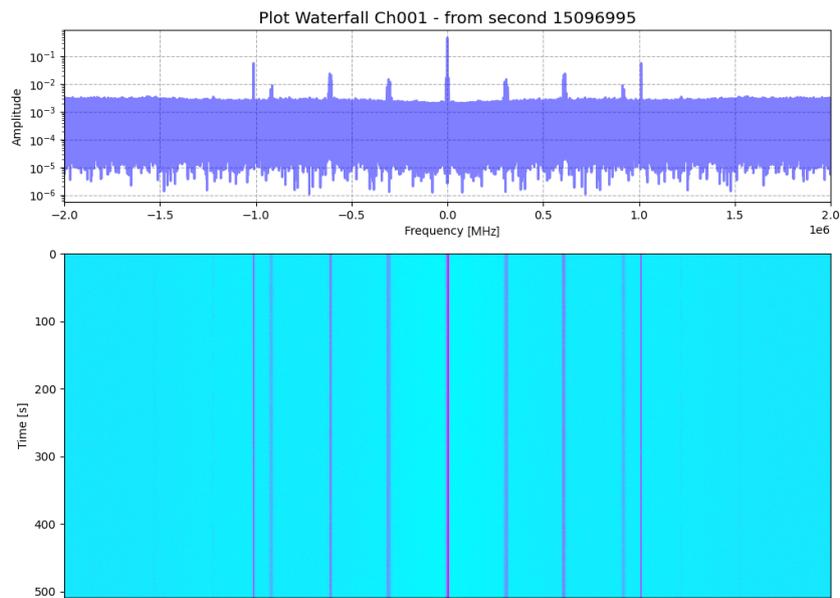


Figura 4.34: Registrazione 4, canale 1.

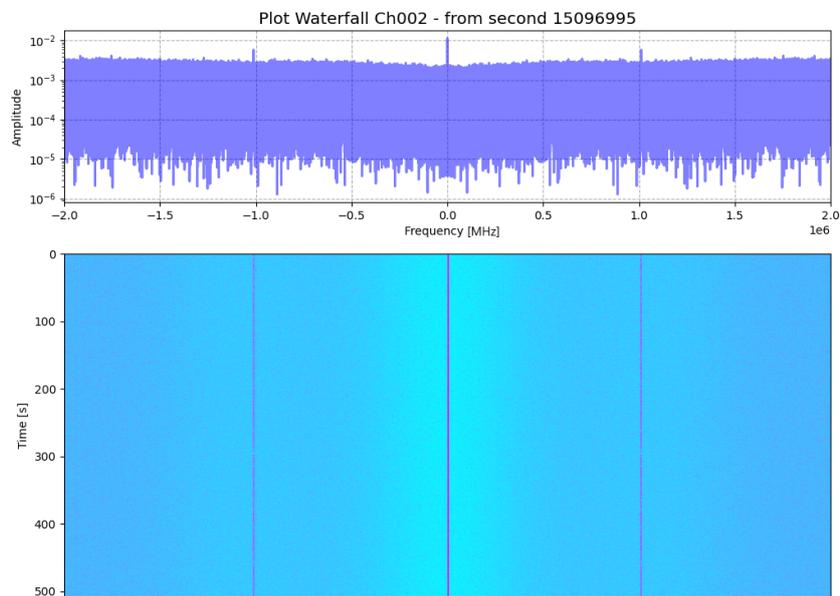


Figura 4.35: Registrazione 4, canale 2.

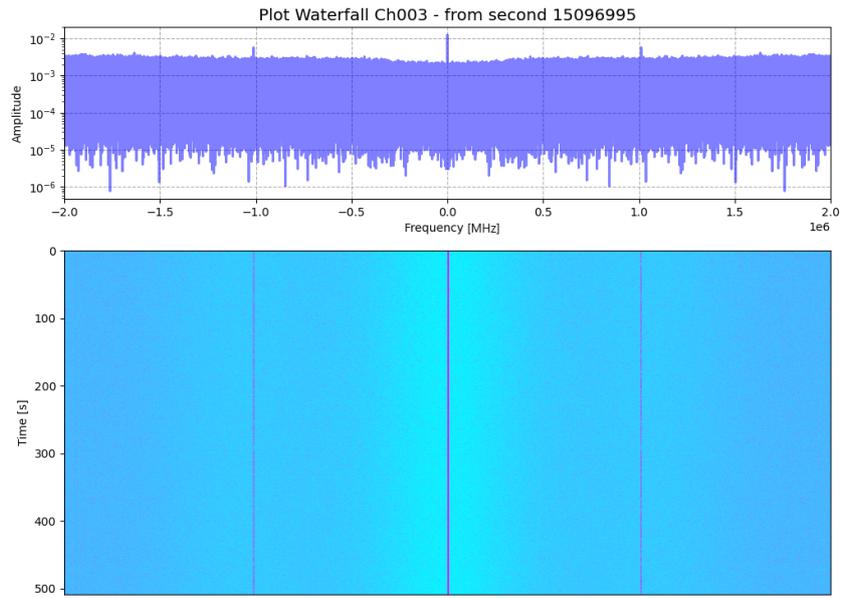


Figura 4.36: Registrazione 4, canale 3.

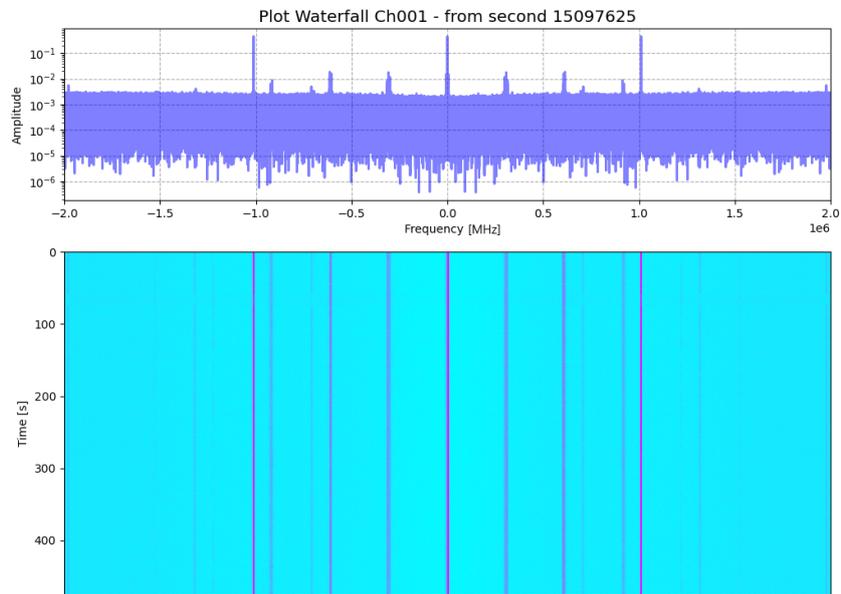


Figura 4.37: Registrazione 5, canale 1.

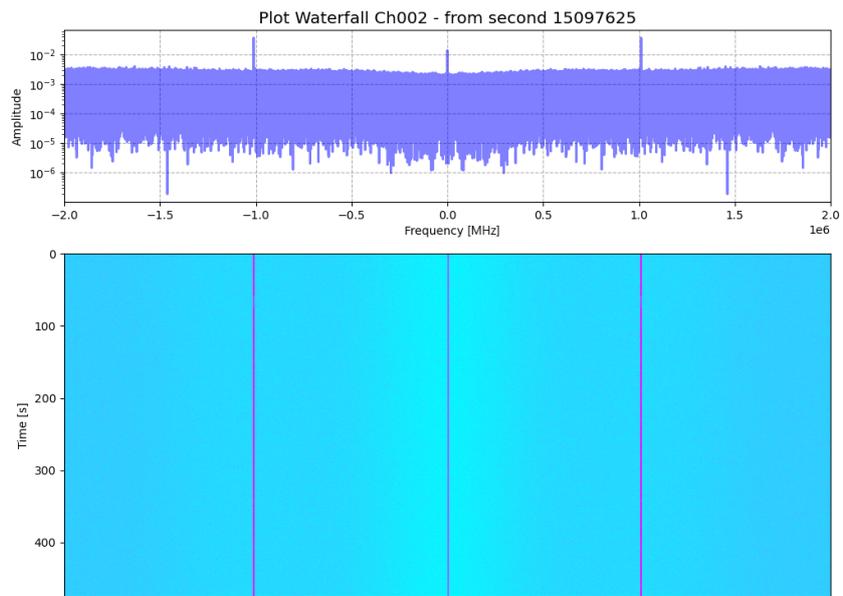


Figura 4.38: Registrazione 5, canale 2.

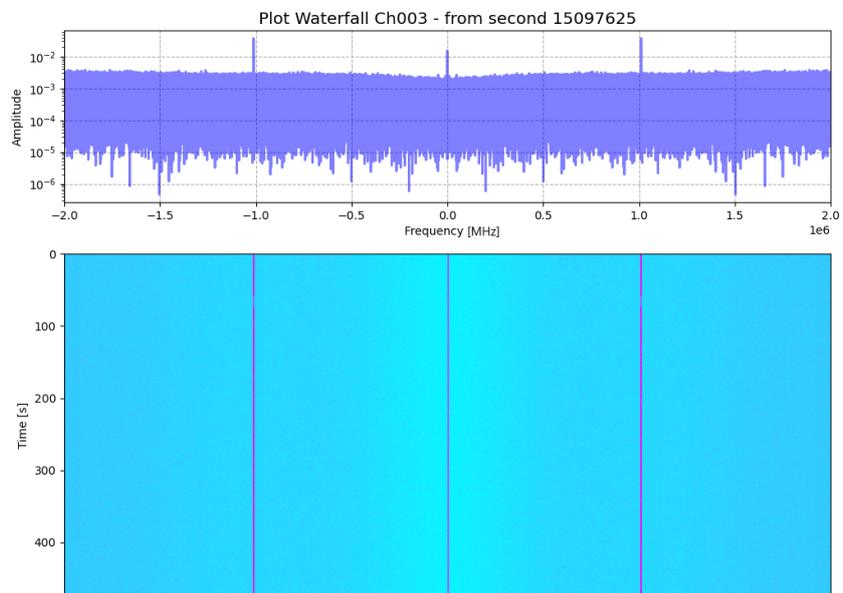


Figura 4.39: Registrazione 5, canale 3.

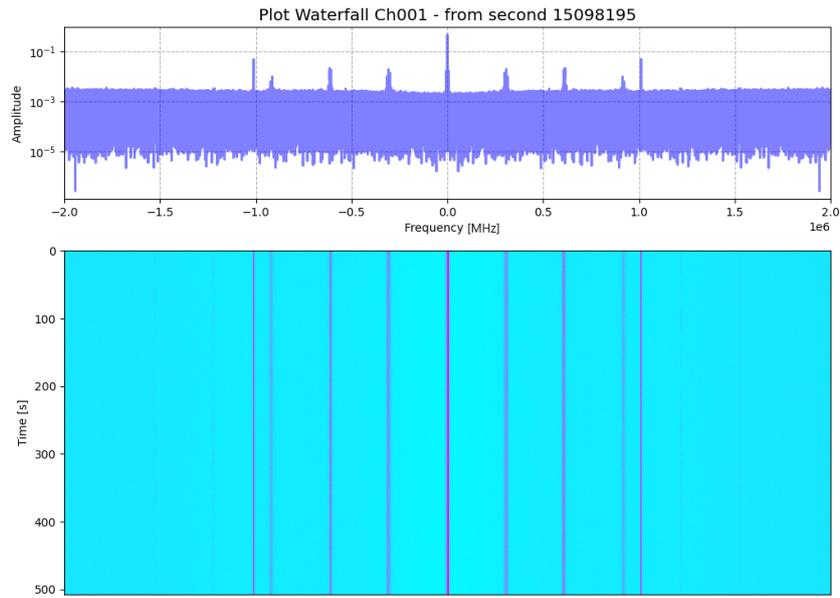


Figura 4.40: Registrazione 6, canale 1.

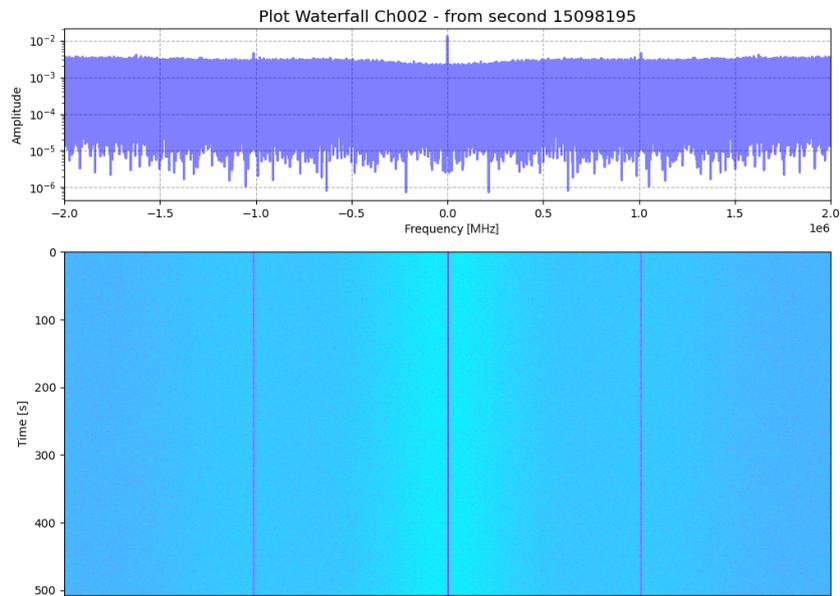


Figura 4.41: Registrazione 6, canale 2.

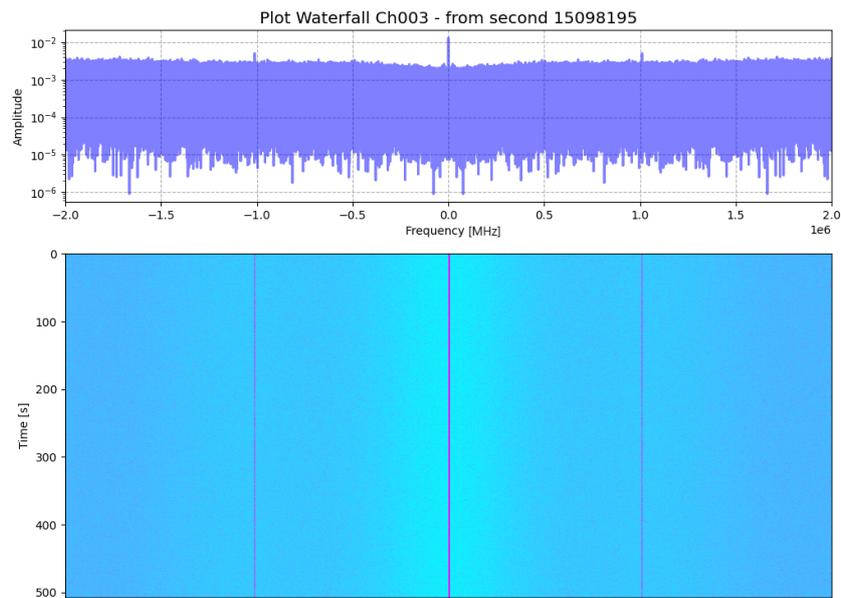


Figura 4.42: Registrazione 6, canale 3.

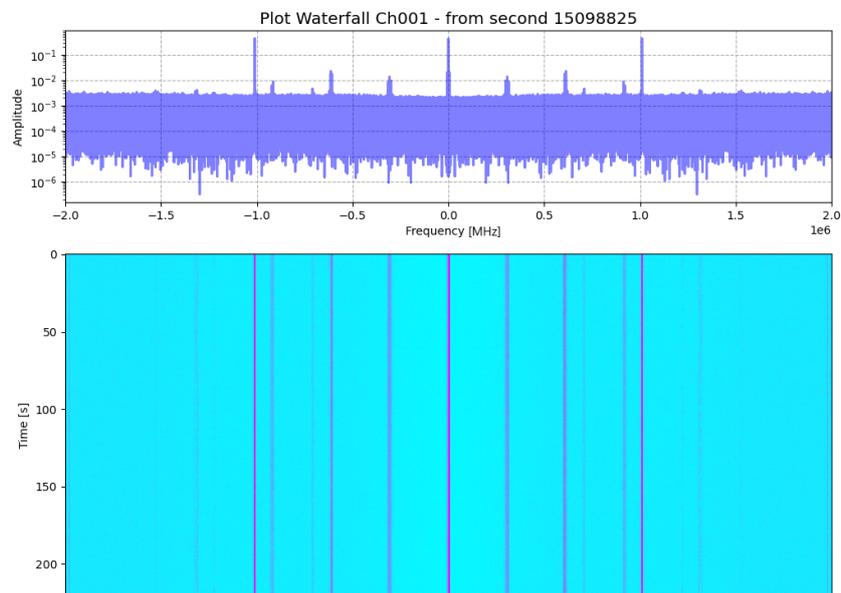


Figura 4.43: Registrazione 7, canale 1.

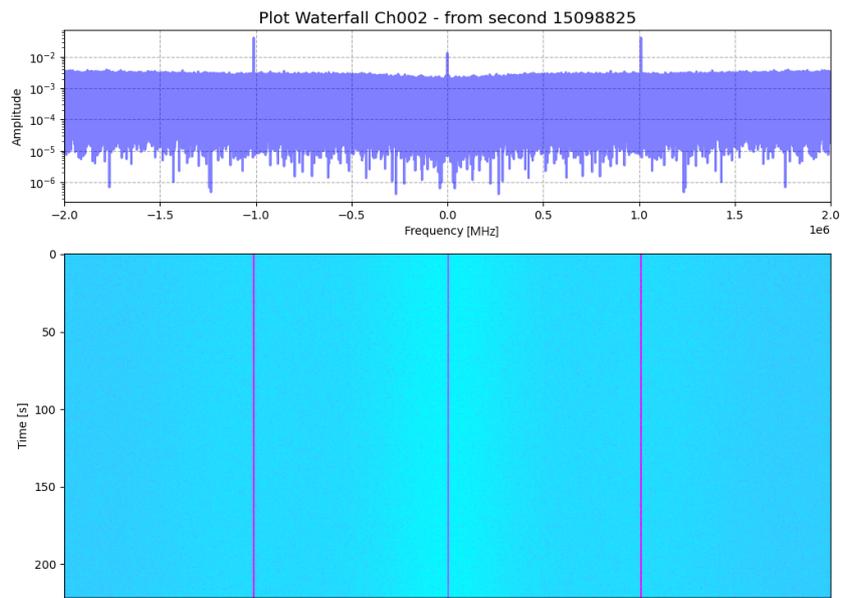


Figura 4.44: Registrazione 7, canale 2.

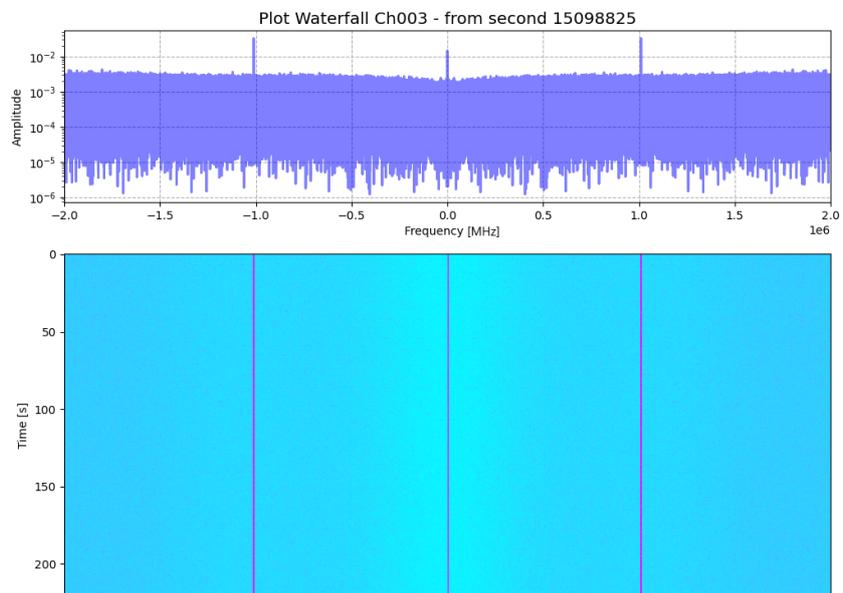


Figura 4.45: Registrazione 7, canale 3.

Elenco delle figure

Figure 1.1	Funzionamento di un Phase Locked Loop. [3]	4
Figure 1.2	Schema di funzionamento di un maser a idrogeno. [4]	4
Figure 1.3	Schematizzazione del funzionamento della tecnica di Ranging (One-way, Two-way, Three-way).	5
Figure 1.4	Vista dal polo Nord terrestre, rappresentazione del campo di acquisizione delle principali antenne del DSN. Quando una missione raggiunge più di 30 000 km di distanza dalla Terra, risulta sempre visibile da almeno una delle stazioni. [13]	7
Figure 1.5	Rappresentazione del ritardo temporale misurato in un'applicazione Delta-DOR. [15]	8
Figure 1.6	Geometria di una misurazione DOR senza calibrazione tramite quasar. [15]	9
Figure 1.7	Geometria di una misurazione DOR con calibrazione tramite quasar. [15]	10
Figure 1.8	Rappresentazione di una classica misurazione Delta-DOR. [17]	11
Figure 1.9	Architettura di un DSP progettato per il Wideband Delta-DOR. [25]	17
Figure 2.1	Waterfall di un segnale simulato con frequenza variabile nel tempo.	24
Figure 2.2	Waterfall rappresentante lo spettro del segnale prelevato dal primo canale, durante la prima registrazione effettuata dalla stazione di Medicina il 22 dicembre 2020.	25
Figure 2.3	Struttura di un Header identificativo di un file VDIF.	28
Figure 2.4	Struttura di una parola da 32 bit all'interno di un file VDIF. Nei file VDIF, a differenza di quelli in formato RDEF, sono presenti soltanto dati reali. (xx indica bit inutilizzati, fissati a 0)	29
Figure 2.5	Struttura dell'Header di un file RDEF, ogni riga è composta da 4 bytes, per un totale di 44 righe.	31
Figure 2.6	Parola di 32 bit in cui è contenuto un campione all'interno di un <i>Product File</i> RDEF.	32
Figure 3.1	Correlazione dei segnali $A(t)$ e $B(t)$ contenente segnale correlato senza shift in frequenza (sopra) e con uno shift in frequenza del segnale $B(t)$ (sotto), dove il picco di correlazione è assente.	35

Figure 3.2	Andamento del risultato della correlazione all'aumentare dell'errore inserito nella correzione in frequenza.	38
Figure 3.3	Comportamento del massimo globale di correlazione al variare della temperatura di sistema e dell'errore nella correzione in frequenza applicata al segnale. I vari colori rappresentano i diversi valori dello scaling assegnato al rumore termico.	39
Figure 3.4	rappresentazione del sistema di riferimento fisso J2000. [46]	41
Figure 3.5	Variazione temporale dello shift in frequenza subito dal segnale spacecraft, ricevuto dalle stazioni di Medicina e Noto.	42
Figure 3.6	Rappresentazione schematica degli input e output di interesse della funzione <i>azlcpo</i> di Spiceypy.	43
Figure 3.7	Azimuth ed Elevation di spacecraft e quasar estratti dagli FD files o ricavati dalle routines di SPICE. Il cerchio rappresenta il primo di tali valori in ordine temporale, il triangolo l'ultimo.	44
Figure 3.8	Proiezione della <i>baseline</i> (vettore rosso) lungo la direzione della quasar (versori verdi).	46
Figure 4.1	Andamento del <i>clock offset</i> nel tempo, estratto dalle misure quasar tramite il correlatore (impostato a partire dagli FD files forniti dal team di Flight Dynamics di ESA).	48
Figure 4.2	Confronto tra le osservabili DOR provenienti dal correlatore, con input dato dai files di FD, dalle routines di SPICE e dal software MONTE. Gli ultimi due metodi sono basati sui kernels pubblici di missione.	49
Figure 4.3	Particolare delle osservabili DOR della prima acquisizione del segnale spacecraft, estratte attraverso i tre metodi: correlatore (FD files), SPICE e MONTE.	50
Figure 4.4	Direzione di riferimento intermedia r , utilizzata dal correlatore.	51
Figure 4.5	Residui DOR ottenuti dall'analisi delle registrazioni VLBI attraverso MONTE. L'errore finale è circa 1.44 ns.	53
Figure 4.6	Residui DOR ottenuti dall'analisi delle registrazioni VLBI attraverso MONTE, con l'esclusione di un <i>outlier</i>	54
Figure 4.7	Registrazione 1, canale 1.	57
Figure 4.8	Registrazione 1, canale 2.	58
Figure 4.9	Registrazione 1, canale 3.	58
Figure 4.10	Registrazione 2, canale 1.	59
Figure 4.11	Registrazione 2, canale 2.	59
Figure 4.12	Registrazione 2, canale 3.	60
Figure 4.13	Registrazione 3, canale 1.	60
Figure 4.14	Registrazione 3, canale 2.	61
Figure 4.15	Registrazione 3, canale 3.	61

Figure 4.16	Registrazione 4, canale 1.	62
Figure 4.17	Registrazione 4, canale 2.	62
Figure 4.18	Registrazione 4, canale 3.	63
Figure 4.19	Registrazione 5, canale 1.	63
Figure 4.20	Registrazione 5, canale 2.	64
Figure 4.21	Registrazione 5, canale 3.	64
Figure 4.22	Registrazione 6, canale 1.	65
Figure 4.23	Registrazione 6, canale 2.	65
Figure 4.24	Registrazione 6, canale 3.	66
Figure 4.25	Registrazione 7, canale 1.	66
Figure 4.26	Registrazione 7, canale 2.	67
Figure 4.27	Registrazione 7, canale 3.	67
Figure 4.28	Registrazione 2, canale 1.	68
Figure 4.29	Registrazione 2, canale 2.	68
Figure 4.30	Registrazione 2, canale 3.	69
Figure 4.31	Registrazione 3, canale 1.	69
Figure 4.32	Registrazione 3, canale 2.	70
Figure 4.33	Registrazione 3, canale 3.	70
Figure 4.34	Registrazione 4, canale 1.	71
Figure 4.35	Registrazione 4, canale 2.	71
Figure 4.36	Registrazione 4, canale 3.	72
Figure 4.37	Registrazione 5, canale 1.	72
Figure 4.38	Registrazione 5, canale 2.	73
Figure 4.39	Registrazione 5, canale 3.	73
Figure 4.40	Registrazione 6, canale 1.	74
Figure 4.41	Registrazione 6, canale 2.	74
Figure 4.42	Registrazione 6, canale 3.	75
Figure 4.43	Registrazione 7, canale 1.	75
Figure 4.44	Registrazione 7, canale 2.	76
Figure 4.45	Registrazione 7, canale 3.	76

Elenco delle tabelle

2.1	Esempio di dati di stazione contenuti nel file SCHED, <i>locations.dat</i>	20
2.3	Esempio di dati di stazione contenuti nel file SCHED, <i>freq.dat</i>	21
2.5	Secondi di registrazione programmati ed effettivi alla stazione di Medicina.	23
2.7	Secondi di registrazione programmati ed effettivi alla stazione di Noto. . .	23
3.1	Massimo globale di correlazione trovato al variare del offset in frequenza. .	39

Bibliografia

- [1] Francesco Fiori, Paolo Tortora, Marco Zannoni, Alessandro Ardito, Marco Menapace, Gabriele Bellei, Frank Budnik, Trevor Morley, Mattia Mercolino, and Roberto Orosei. Deep space orbit determination via Delta-DOR using VLBI antennas. *CEAS Space Journal*, 14(2):421–430, April 2022.
- [2] Alan Whitney, Mark Kettenis, Chris Phillips, and Mamoru Sekido. VLBI Data Interchange Format (VDIF). December 2010. NTRS Author Affiliations: Northeast Radio Observatory Corp., Joint Inst. for VLBI in Europe, Australia Telescope National Facility, National Inst. of Information and Communications Technology NTRS Document ID: 20110011868 NTRS Research Center: Goddard Space Flight Center (GSFC).
- [3] Ian Collins. Phase-locked loop (pll) fundamentals. *SSB*, 130(140):150, 2018.
- [4] Daniel Kleppner, HC Berg, SB Crampton, NF Ramsey, Robert FC Vessot, HE Peters, and Jacques Vanier. Hydrogen-maser principles and techniques. *Physical Review*, 138(4A):A972, 1965.
- [5] Silvia Tellmann, Martin Pätzold, Bernd Häusler, Michael K. Bird, and G. Leonard Tyler. Structure of the Venus neutral atmosphere as observed by the Radio Science experiment VeRa on Venus Express. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 114(E9), 2009. [_eprint: https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1029/2008JE003204](https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1029/2008JE003204).
- [6] W. M. Folkner, L. Iess, J. D. Anderson, S. W. Asmar, D. R. Buccino, D. Durante, M. Feldman, L. Gomez Casajus, M. Gregnanin, A. Milani, M. Parisi, R. S. Park, D. Serra, G. Tommei, P. Tortora, M. Zannoni, S. J. Bolton, J. E. P. Connerney, and S. M. Levin. Jupiter gravity field estimated from the first two Juno orbits. *Geophysical Research Letters*, 44(10):4694–4700, 2017. [_eprint: https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/2017GL073140](https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/2017GL073140).
- [7] Paolo Tortora, Marco Zannoni, Doug Hemingway, Francis Nimmo, Robert A. Jacobson, Luciano Iess, and Marzia Parisi. Rhea gravity field and interior modeling from Cassini data analysis. *Icarus*, 264:264–273, January 2016.

- [8] Marco Zannoni, Giacomo Tommei, Dario Modenini, Paolo Tortora, Ruairaidh Mackenzie, Mehdi Scoubeau, Ulrich Herfort, and Ian Carnelli. Radio science investigations with the Asteroid impact mission. *Advances in Space Research*, 62(8):2273–2289, October 2018.
- [9] R.E. Wallis, G.L. Weaver, M.J. Reinhart, and Sheng Cheng. *An advanced synthesized ultra-stable oscillator for spacecraft applications*. April 2005. Pages: 960.
- [10] S. S. Shapiro, J. L. Davis, D. E. Lebach, and J. S. Gregory. Measurement of the Solar Gravitational Deflection of Radio Waves using Geodetic Very-Long-Baseline Interferometry Data, 1979–1999. *Physical Review Letters*, 92(12):121101, March 2004.
- [11] R. D. Reasenberg, I. I. Shapiro, P. E. MacNeil, R. B. Goldstein, J. C. Breidenthal, J. P. Brenkle, D. L. Cain, T. M. Kaufman, T. A. Komarek, and A. I. Zygielbaum. Viking relativity experiment - Verification of signal retardation by solar gravity. *The Astrophysical Journal*, 234:L219, December 1979.
- [12] NASA Deep Space Network, August 2023. Page Version ID: 1169642421.
- [13] JD Dvorsky, NA Renzetti, and DE Fulton. The goldstone solar system radar: A science instrument for planetary research. Technical report, 1992.
- [14] B. Bertotti, L. Iess, and P. Tortora. A test of general relativity using radio links with the Cassini spacecraft. *Nature*, 425(6956):374–376, September 2003. Number: 6956 Publisher: Nature Publishing Group.
- [15] GREEN BOOK. Delta-DOR—Technical Characteristics and Performance. 2013.
- [16] Simone Acciarito, Gian Carlo Cardarilli, Gaurav Mani Khanal, Marco Matta, Marco Re, Francesca Silvestri, Sergio Spanò, Dario Gelfusa, and Lorenzo Simone. Digital Architecture of Next Generation Spacecraft Tracker Based on Wideband delta-DOR. In Alessandro De Gloria, editor, *Applications in Electronics Pervading Industry, Environment and Society*, Lecture Notes in Electrical Engineering, pages 17–24, Cham, 2019. Springer International Publishing.
- [17] David W Curkendall and James S Border. Delta-dor: The one-nanoradian navigation measurement system of the deep space network—history, architecture, and componentry. *The Interplanetary Network Progress Report*, 42:193, 2013.
- [18] G. Panfilo and F. Arias. The Coordinated Universal Time (UTC). *Metrologia*, 56(4):042001, June 2019. Publisher: IOP Publishing.
- [19] Heather Monaghan. About the Deep Space Network, March 2020.

-
- [20] Petros Pissias. Schedule execution and health monitoring of the esa ground stations: The estrack coordination system. *DASIA 2010-Data Systems In Aerospace*, 682:47, 2010.
- [21] Rolf Martin and M Warhaut. Esa’s 35-meter deep space antennas at new norcia/western australia and cebreros/spain. In *2004 IEEE Aerospace Conference Proceedings (IEEE Cat. No. 04TH8720)*, volume 2, pages 1124–1133. IEEE, 2004.
- [22] Luciano Iess, F Budnik, Claudio Colamarino, Alberto Corbelli, Mauro Di Benedetto, V Fabbri, Alberto Graziani, R Hunt, Nick James, M Lanucara, R Maddè, Manuela Marabucci, Gilles Mariotti, Mattia Mercolino, Paolo Racioppa, Lorenzo Simone, Paolo Tortora, Mark Westcott, and Marco Zannoni. *IMPROVING TRACKING SYSTEMS FOR DEEP SPACE NAVIGATION*. September 2013.
- [23] Gian Carlo Cardarilli, Luca Di Nunzio, Rocco Fazzolari, Dario Gelfusa, Marco Matta, Alberto Nannarelli, Marco Re, Lorenzo Simone, and Sergio Spanò. Digital Architecture and ASIC Implementation of Wideband Delta DOR Spacecraft Onboard Tracker. In *2018 15th International Conference on Synthesis, Modeling, Analysis and Simulation Methods and Applications to Circuit Design (SMACD)*, pages 1–20, July 2018.
- [24] F. Barbaglio, Alessandro Ardito, Luciano Iess, M. Lanucara, R. Madde’, Mattia Mercolino, and G. Rapino. *ESA Delta-DOR enhancement: agencies interoperability, wideband and low-snr functionality*. October 2012.
- [25] Gian Carlo Cardarilli, Luca Di Nunzio, Rocco Fazzolari, Daniele Giardino, Marco Matta, Marco re, Luciano Iess, Fabio Cialfi, Giorgio Angelis, Dario Gelfusa, Ascanio Pulcinelli, and Lorenzo Simone. Hardware Prototyping and Validation of a W-delta-DOR Digital Signal Processor. *Applied Sciences*, July 2019.
- [26] H. Schuh and D. Behrend. VLBI: A fascinating technique for geodesy and astrometry. *Journal of Geodynamics*, 61:68–80, October 2012.
- [27] Simonetta Montaguti. Studio delle deformazioni gravitazionali delle antenne vlbi di medicina e di noto con metodologiche laser scanning, topografiche e fem. 2008.
- [28] A Orfei, M Morsiani, G Zacchiroli, G Maccaferri, J Roda, and F Fiocchi. The Active Surface System on the Noto Radio Telescope.
- [29] vlba.nrao.edu/astro/calib/. NRAO quasar catalog official list of ecg, 2023.
- [30] THE SCHED USER MANUAL Version 11.3 Update 1 of April 14, 2014.

- [31] Zuheir Altamimi, Paul Rebischung, Laurent Métivier, and Xavier Collilieux. Itrf2014: A new release of the international terrestrial reference frame modeling nonlinear station motions. *Journal of geophysical research: solid earth*, 121(8):6109–6131, 2016.
- [32] Marc Costa. SPICE for ESA Planetary Missions: geometry and visualization support to studies, operations and data analysis within your reach. In *2018 SpaceOps Conference*, SpaceOps Conferences. American Institute of Aeronautics and Astronautics, May 2018.
- [33] Andrew Annex, Ben Pearson, Benoît Seignovert, Brian Carcich, Helge Eichhorn, Jesse Mapel, Johan Von Forstner, Jonathan McAuliffe, Jorge Del Rio, Kristin Berry, K.-Michael Aye, Marcel Stefko, Miguel De Val-Borro, Shankar Kulamani, and Shinya Murakami. SpiceyPy: a Pythonic Wrapper for the SPICE Toolkit. *Journal of Open Source Software*, 5(46):2050, February 2020.
- [34] JS Border and ER Kursinski. Deep space tracking and frequency standards. In *Proceedings of the 45th Annual Symposium on Frequency Control 1991*, pages 594–607. IEEE, 1991.
- [35] Eric W. Weisstein. Full Width at Half Maximum. Publisher: Wolfram Research, Inc.
- [36] B Grieger, R Kayser, and S Refsdal. A parallax effect due to gravitational microlensing. *Nature*, 324(6093):126–127, 1986.
- [37] Alan Whitney, Mark Kettenis, Chris Phillips, and Mamoru Sekido. Vlbi data interchange format (vdif). In *Proceedings of the Sixth General Meeting of the International VLBI Service for Geodesy and Astrometry*, 2010.
- [38] Armin W Doerry. Balancing i/q data in radar range-doppler images. In *Radar Sensor Technology XIX; and Active and Passive Signatures VI*, volume 9461, pages 617–630. SPIE, 2015.
- [39] CCSDS Secretariat. *Delta-DOR Raw Data Exchange Format*. Number CCSDS 506.1-B-1 in BLUE BOOK. Washington, DC, USA, June 2013.
- [40] M. I. Khalil. International Journal of Image, Graphics and Signal Processing(IJIGSP). *International Journal of Image, Graphics and Signal Processing(IJIGSP)*, 5(12):26.
- [41] Fuad Badrieh and Fuad Badrieh. Properties of the fourier transforms. *Spectral, Convolution and Numerical Techniques in Circuit Theory*, pages 155–183, 2018.
- [42] Jonathan I. Lunine. Atmospheric Radiation: Theoretical Basis. *Science*, 247(4941):476–477, January 1990. Publisher: American Association for the Advancement of Science.

- [43] Bernard F Burke, Francis Graham-Smith, and Peter N Wilkinson. *An introduction to radio astronomy*. Cambridge University Press, 2019.
- [44] Bernd Fellmuth, Ch Gaiser, and Joachim Fischer. Determination of the boltzmann constant—status and prospects. *Measurement Science and Technology*, 17(10):R145, 2006.
- [45] An Overview of Reference Frames and Coordinate Systems in the SPICE Context, April 2023.
- [46] Navipedia ESA. Conventional Celestial Reference System esa, 2023.