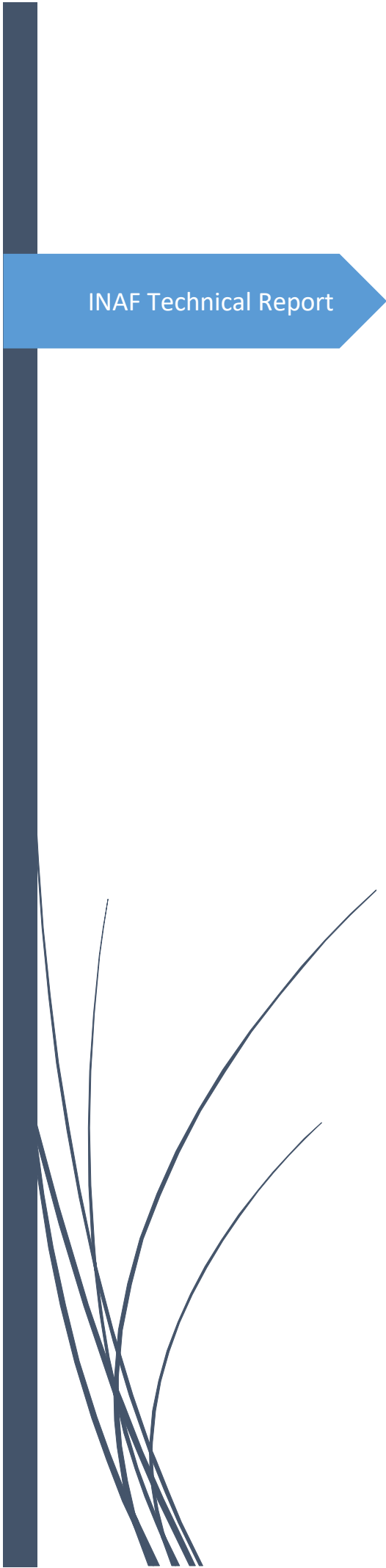




Rapporti Tecnici INAF INAF Technical Reports

Number	6
Publication Year	2019
Acceptance in OA@INAF	2020-01-28T11:04:15Z
Title	Misure RADAR Stazione Spaziale Internazionale (ISS) del settembre/ottobre 2019
Authors	ORTU, Pierluigi, Giacomo Muntoni, Giorgio Montisci, PISANU, Tonino, MAXIA, PAOLO
Affiliation of first author	O.A. Cagliari
Handle	http://hdl.handle.net/20.500.12386/23055 , http://dx.doi.org/10.20371/INAF/TechRep/6

A thick dark blue vertical bar runs along the left edge of the page. A blue arrow-shaped banner points to the right from this bar, containing the text 'INAF Technical Report'. In the lower-left corner, several thin, dark blue curved lines sweep upwards and to the right, resembling stylized grass or reeds.

INAF Technical Report

Misure RADAR Stazione Spaziale Internazionale (ISS) del settembre/ottobre 2019

Pierluigi Ortu (INAF-OAC), Giacomo Muntoni
(DIEE), prof. Giorgio Montisci (DIEE), Tonino
Pisanu (INAF-OAC), Paolo Maxia (INAF-OAC)

Sommario

Introduzione	2
La sezione trasmittente	2
La sezione ricevente	4
Misure del 25-09-2019	10
Misure del 26-09-2019	16
Misure del 02/10/2019	20
Misure del 11/10/2019	24
Conclusioni	29

Introduzione

Il presente rapporto si prefigge l'obiettivo di fornire una panoramica esaustiva sulle misure radar della stazione spaziale internazionale (ISS) effettuate dal gruppo di elettromagnetismo del DIEE in collaborazione con il personale dell'Osservatorio Astronomico di Cagliari (INAF-OAC). La campagna di misure si configura all'interno del progetto di ricerca DATA FUSION, riguardante la fusione dei dati provenienti da sensori ottici e radar per la determinazione orbitale di detriti spaziali. Gli echi radar della stazione spaziale sono stati ricevuti e registrati nelle date del 25-26 Settembre e del 2-11 Ottobre 2019. La configurazione radar utilizzata per osservare il passaggio della ISS è bi-statica, perciò costituita da una struttura trasmittente ed una ricevente.

La sezione trasmittente

La **sezione trasmittente** della struttura bi-statica è costituita dal GRAVES (Grand Réseau pour la Veille Spatiale), radar militare situato in Francia, a Digione, sviluppato dallo stabilimento di ricerca aerospaziale francese (ONERA) e sotto il controllo del ministero della difesa francese. La frequenza di funzionamento dell'array è di **143.050 MHz**. Già di per sé il GRAVES è una struttura bi-statica poiché è costituita da una parte trasmittente (un phased array) che consiste in 4 pannelli e di una ricevente costituita da una foresta di dipoli, situata a circa 350 km a sud del sito trasmittente. Ogni pannello della parte trasmittente è costituito da un array di 30 antenne patch quadrate di lato 1,5 m circa. L'array ricevente invece è costituito da 100 antenne distribuite su un disco metallico che funge da ground plane. Il GRAVES illumina tutta la parte meridionale del cielo, infatti ogni pannello della sezione trasmittente copre 45° in azimuth per un totale di 180°. Per garantire la copertura su tutti i 45°, essendo l'apertura dei fasci in azimuth di 7,5°, il puntamento dell'antenna viene modificato "elettricamente" in 6 passi fissi spazati 7,5° (a ciclo continuo, tipicamente ogni 1-3 secondi ed in sincronia con gli altri tre), ottenendo un campo di vista totale di +/-22,5° attorno all'asse "meccanico" di ciascun pannello. Per quanto riguarda l'elevazione, le antenne hanno un puntamento di circa 30° con un'apertura di circa 25° (da 15° a 40°). Queste caratteristiche si possono apprezzare in figura 1, dove vengono riportati i plot in azimuth e elevazione della parte trasmittente. Secondo l'esperienza del radioamatore olandese Rob Hardenberg (che ha già eseguito esperimenti di moon bounce sfruttando il GRAVES) con cui abbiamo avuto uno scambio di mail, approssimativamente ogni pannello del GRAVES irradia tra i **5 e i 10 MegaWatt ERP** in onda continua (CW).

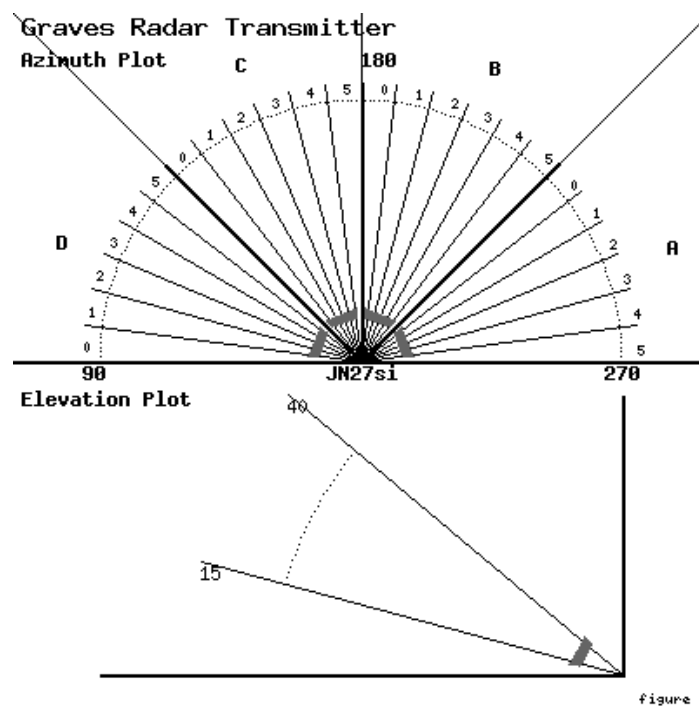


Figure 1. Rappresentazione del fascio del GRAVES in Azimut e Elevazione.

In figura 2 è riportata un'immagine di uno dei 4 pannelli che costituiscono il GRAVES.



Figure 2. Foto di uno dei 4 pannelli costituenti il GRAVES.

La sezione ricevente

La **sezione ricevente** del sistema bi-statico è costituito da un array 2x2 di antenne commerciali YAGI funzionanti nella banda radioamatoriale 144-146 MHz, sostenute da un piano di massa di circa 10 m². Tale frequenza differisce leggermente dalla frequenza portante del GRAVES (143.050 MHz), tuttavia questo problema è stato ovviato garantendo un buon adattamento di impedenza all'array di YAGI grazie alla rete di alimentazione dedicata. Le caratteristiche della singola antenna YAGI (reperibile sul sito PKW antenne <http://www.antennepkw.com/>) sono riportate in figura 3.

Modello.....	MHF6e
Frequenza di lavoro.....	144-146 MHz
Massima potenza ammessa.....	500w P.e.P.
Alimentazione	SO239
Guadagno	13 dBd
Fronte/retro.....	22 dB
SWR medio	1:1,5
Lunghezza boom.....	m.1,69
Lunghezza elemento.....	m.1,06
Resistenza al vento.....	120 Km/h
Accessori & bulloneria	in acciaio inox
Peso.....	Kg.2,0

Figura 3. Caratteristiche del singolo elemento dell'array ricevente.

In figura 4, viene riportata una foto scattata al sistema ricevente di antenne YAGI, poco prima della cattura del passaggio dell'ISS. L'array di antenne è stato montato sul tetto di una delle strutture dell'INAF-OAC, da cui si è potuta garantire una buona manovrabilità della struttura e al contempo evitare qualunque tipologia di ostacolo che potesse deteriorare la prestazione dell'antenna. Il sistema ricevente presenta un guadagno di circa 15.8 dBi alla frequenza nominale di 143.050 MHz in direzione broadside, come intuibile dal diagramma di irradiazione riportato in figura 5 e simulato attraverso il software commerciale full-wave HFSS.

Il dimostratore fin qui descritto è stato creato per essere in grado di catturare gli echi radar scatterati dalla ISS. La stazione spaziale internazionale orbita a circa 400 km di altitudine, all'interno della LEO (Low Earth Orbit), che comprende altitudini fra i 200 e i 2000 km dalla superficie terrestre. È caratterizzata da una massa totale di 419 455 kg e da una sezione radar (caratteristica importante per la sua visibilità in ambito radar) di 402 m². Una foto della ISS viene riportata in figura 6.

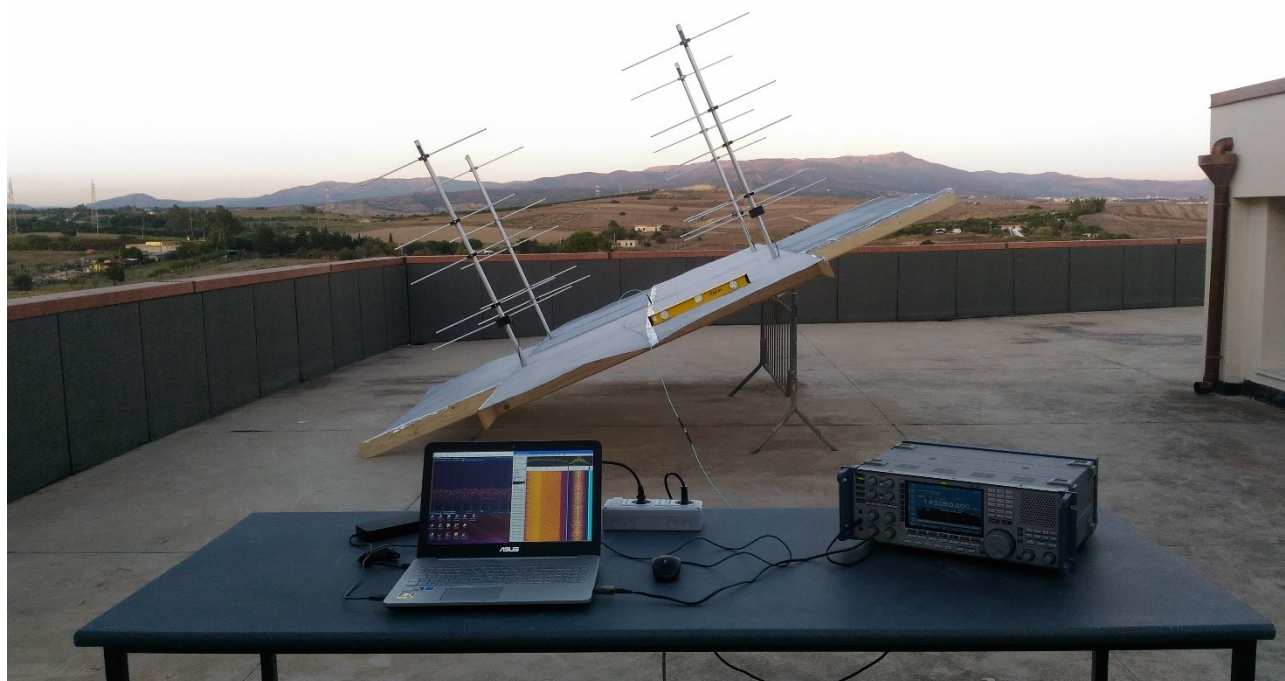


Figura 4. Foto del sistema ricevente costituito dall'array di YAGI.

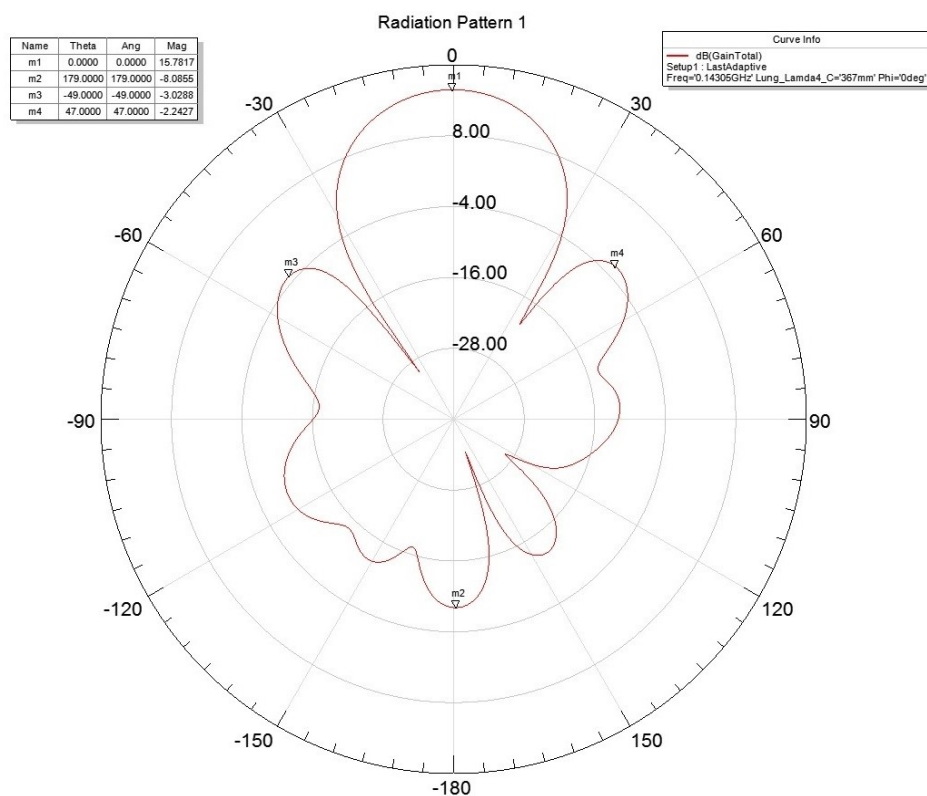


Figura 5. Guadagno dell'array progettato alla frequenza di 143.05 MHz.



Figura 6. Foto della stazione spaziale internazionale in orbita.

Lo schema generale del sistema bi-statico costituito dal GRAVES e dall'array di antenne YAGI è stato riportato in figura 7. Come si può notare la baseline del sistema radar è di 960 km in totale.

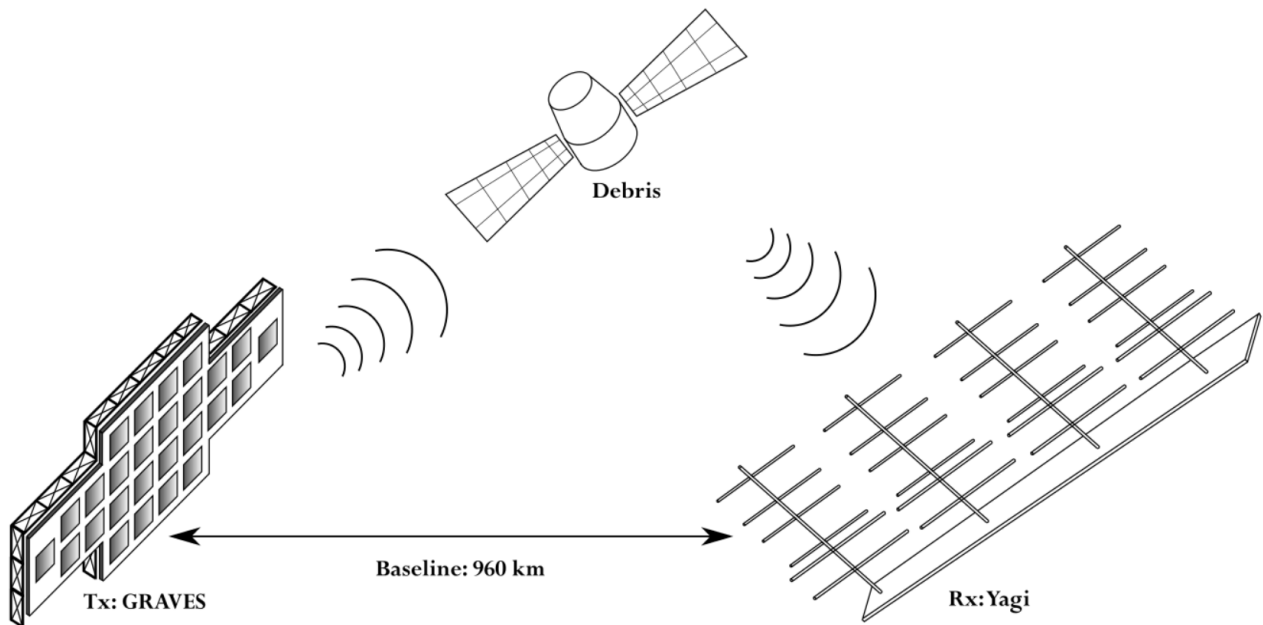


Figura 7. Schema generale del sistema bi-statico utilizzato per ricevere gli echi radar della ISS.

Prima della campagna di misura vera e propria sono state eseguite una serie di simulazioni per accertare l'effettiva visibilità della stazione spaziale utilizzando il sistema radar bi-statico sopra descritto. Ciò è stato possibile stimando i livelli di potenza ricevuti. Questi ultimi possono essere valutati utilizzando la ben nota equazione del radar (bi-statico):

$$P_R = \frac{P_T G_T G_R \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 R_T^2 R_R^2}$$

dove P_R è la potenza ricevuta, P_T la potenza trasmessa, G_T è il guadagno in trasmissione, G_R il guadagno in ricezione, λ la lunghezza d'onda alla frequenza di lavoro, σ la sezione radar dell'oggetto, R_T la distanza dell'oggetto dal trasmettitore e R_R quella dell'oggetto dal ricevitore. Per gli oggetti in orbita viene fornita la sezione radar media, calcolata come:

$$\sigma(RCS) = \text{sezione trasversa proiettata} \times \text{riflettività} \times \text{direttività}$$

dove la riflettività è percentuale della potenza intercettata dal bersaglio che viene re-irradiata (diffusa) e la direttività è il rapporto tra la potenza che viene realmente re-irradiata in direzione del radar e la potenza che sarebbe dovuta essere re-irradiata nel caso di diffusione uniforme in tutte le direzioni. Avendo a disposizione tutte le informazioni necessarie è possibile stimare la curva di potenza ricevuta. La differenza di quest'ultima col rumore di fondo rilevabile dal radar fornisce in uscita il rapporto segnale-rumore (SNR). Come regola pratica si può stabilire che un oggetto è visibile se il SNR è ≥ 10 dB circa, poiché vanno tenute in conto perdite dovute alla strumentazione utilizzata. Tenendo presente che la distanza del sistema ricevente dalla ISS (range) varia tra 500 e 1000 km per i passaggi più favorevoli, in figura 8 viene riportata la stima dei livelli di potenza e il conseguente SNR per la ricezione dell'eco radar della ISS sfruttando il sistema bi-statico descritto.

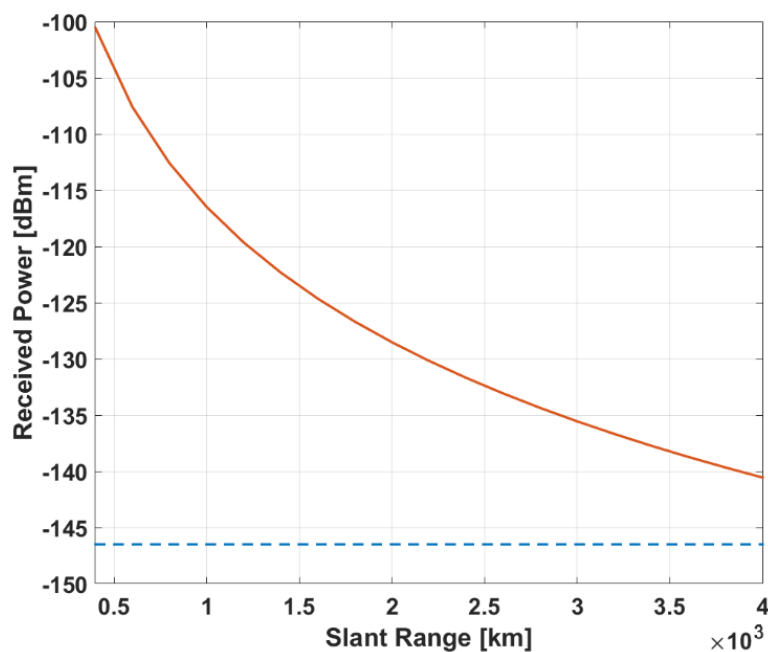


Figura 8. SNR e potenza ricevuta dal sistema RADAR bistatico a 143.05 MHz dovuta allo scattering della ISS.

La linea tratteggiata in blu rappresenta il Noise Floor, calcolato tenendo conto della temperatura di rumore delle antenne, del background (cielo) e della banda di rumore del ricevitore. Come è possibile apprezzare dalla figura, i valori di SNR fino a 2000 km di slant range (equivalente a $R_T + R_R$ in riferimento all'equazione del radar bi-statico) sono ben al di sopra di 10 dB, garantendo la visibilità dell'oggetto in orbita.

Per quanto riguarda il rapporto segnale rumore, essendo la trasmissione radar in CW, questo difficilmente potrà essere utilizzato per stimare con precisione la distanza del detrito, in quanto questa informazione è molto sensibile alle condizioni di osservazione, alle condizioni atmosferiche e alla sezione RADAR del detrito, che è nota solo in valor medio. Per quanto riguarda invece la velocità del detrito questa

può essere determinata con buona precisione a partire dalla misura del doppler in frequenza mediante la formula:

$$\Delta f = \frac{1}{\lambda} (v \cdot \hat{\rho}_{RX} + v \cdot \hat{\rho}_{TX})$$

dove v è la velocità dell'oggetto lungo la sua orbita, λ è la lunghezza d'onda alla frequenza di lavoro, $\hat{\rho}_{TX}$ and $\hat{\rho}_{RX}$ sono i versori dei vettori di congiunzione tra trasmettitore e bersaglio e ricevitore e bersaglio, rispettivamente, con riferimento allo schema in Figura 9. Il sistema radar bi-statico utilizzato, per le ragioni sopra elencate, può essere quindi classificato come "Radar Doppler".

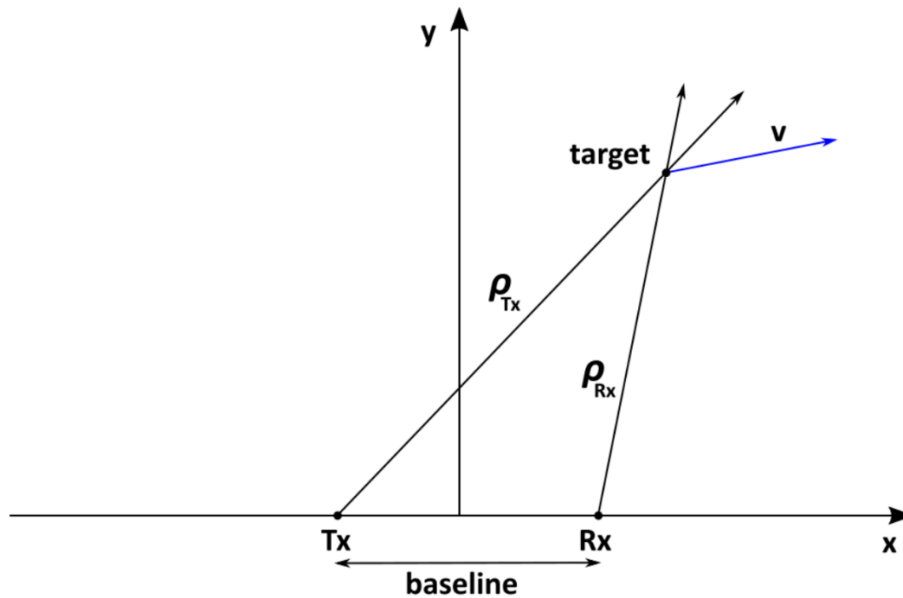


Figura 9. Schema geometrico del calcolo del Doppler.

Prima di effettuare la campagna di misure è assolutamente necessario elaborare i dati orbitali dell'oggetto che si vuole osservare per ricavare gli angoli di puntamento dell'antenna ricevente. Infatti il controllo sul puntamento dell'antenna si ha solo sull'antenna ricevente, avendo il GRAVES un puntamento fisso, oltre che essendo esso sotto il controllo della difesa francese. Possono venir giudicati idonei, infatti, solamente i passaggi favorevoli rispetto all'antenna ricevente, che siano però illuminati dal fascio del GRAVES. A questo proposito, sebbene non sussista un problema riguardante il puntamento in azimuth, visto che i passaggi della ISS favorevoli avvengono sempre a sud rispetto alla posizione del GRAVES, tale problema esiste per quanto riguarda il puntamento in elevazione. Come descritto precedentemente, infatti, il fascio del GRAVES in elevazione ha un puntamento di circa 30° con una larghezza di 25° (da 15° a 45° di conseguenza). Sarà perciò necessario che i passaggi della ISS giudicati idonei per l'antenna ricevente, siano compresi all'interno di questo range di elevazione.

Il calcolo degli angoli di puntamento si basa sulla lettura e l'elaborazione dei dati orbitali degli oggetti, che vengono forniti con costante frequenza dal JSpOC statunitense sotto forma di Two-Line Element set (TLE). La procedura prevede di scaricare dalla rete le TLE aggiornate (non più vecchie di una settimana) e processarle con un software o algoritmo che propaghi queste informazioni orbitali fino al momento designato per la misura, per ottenere i puntamenti dell'antenna in azimuth o elevazione. Uno dei software più affidabili in questo senso risulta essere WXtrack, che permette anche di visualizzare in tempo reale il passaggio degli oggetti e il relativo footprint sulla mappa terrestre (come riportato in figura 10). Oltre a fornire in ingresso le TLE al software è necessario specificare le coordinate geografiche dei siti di trasmissione e ricezione e la data

in cui si desidera prevedere il passaggio. Le coordinate geografiche relative al GRAVES e al sistema ricevente sono:

TRASMETTITORE (GRAVES): latitudine = 47.347833° N; longitudine = 5.515175° E; altitudine = 200 m s.l.m.

RICEVITORE: latitudine = 39.281813° N; longitudine = 9.131565° E; altitudine = 60 m s.l.m.

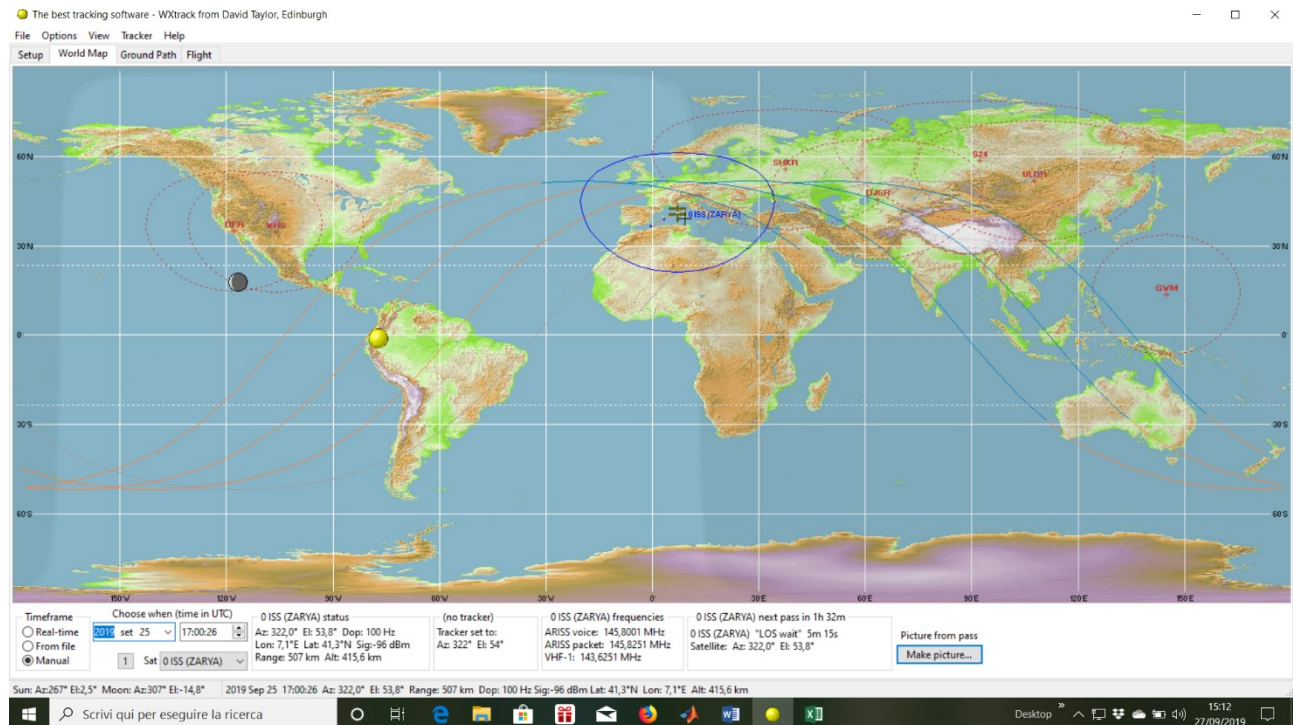


Figura 10. Schermata del software amatoriale WXtrack.

La precisione dei dati di puntamento forniti da WXtrack arriva fino alla prima cifra decimale, sufficiente per la campagna di misure descritta. Tuttavia, al fine di avere un puntamento più raffinato e per poter confermare i dati forniti in output dal software, è stato sviluppato un algoritmo in Python che esegue le medesime operazione di WXtrack, essendo in grado di calcolare i dati di puntamento di un'antenna, a partire dalle TLE e dalle posizioni geografiche di trasmettitore e ricevitore. L'algoritmo arriva ad una precisione fino alla terza cifra decimale. I criteri per considerare un passaggio "favorevole" sono legati al puntamento in elevazione dell'antenna ricevente, che dovrà essere il più prossimo possibile ai 90°, valori a cui il contributo di temperatura di rumore del cielo è più basso, e che siano compresi nel range di valori in elevazione 15°-45° del fascio del GRAVES. In tabella 1, sono riportati i passaggi e relativi puntamenti previsti giudicati favorevoli secondo questi criteri, per le date 25-26 Settembre e 2-11 Ottobre 2019. Oltre ai dati di puntamento, è stata riportata anche la stima del Doppler per ogni passaggio.

Tabella 1. Passaggi e relativi angoli di puntamento della campagna di misura.

	25/09/2019	26/09/2019	02/10/2019	11/10/2019
TIME (UTC)	17:00:26	16:11:59	14:34:30	17:01:03
Azimuth (°)	322.2	141.5	325.3	219
Elevation (°)	53.8	84.5	37.6	82.4
GRAVES Elevation (°)	27.2	18.0	36.5	18
Estimated Doppler (Hz)	1312	974	1506	-2659

La stima del Doppler shift è stata valutata ricorrendo ad un algoritmo in Matlab, in grado di convertire i dati orbitali delle TLE in coordinate nel sistema di riferimento ECEF e applicare la formula per il calcolo del Doppler descritta in precedenza secondo lo schema di figura 9. Per sicurezza e per avere un margine di operabilità sono stati calcolati anche i puntamenti nei 30 secondi prima e 30 secondi dopo il passaggio designato in ogni giornata di misure.

Come è possibile vedere in figura 4, il sistema di array YAGI ricevente è stato connesso al canale ANT1 di un ricevitore ICOM IC-R9500 sintonizzato sulla frequenza 143.0493 MHz, ossia 700 Hz al di sotto della frequenza della portante del GRAVES. Il ricevitore ICOM viene poi connesso alla scheda audio di un PC portatile tramite cavetto schermato. Grazie a questo collegamento la ricezione dell'eco Doppler della ISS non si manifesta soltanto visivamente ma può essere anche udita, tramite il cosiddetto "fischio Doppler". Il segnale ricevuto dalle antenne viene elaborato dal PC tramite un programma freeware chiamato Argo. Il software è un Audio Spectrum Analyzer in grado di convertire i segnali temporali in segnali in frequenza, applicando una Fast Fourier Transform (FFT). Le impostazioni iniziali del software sono state settate su: 0 dB ADC Full Scale, Sample Rate = 22050 sample/sec, FFT bin size = 5.38 Hz. I segnali ricevuti vengono mostrati a video all'interno della banda audio SSB/CW del ricevitore che va da 200 a 2700 Hz, sotto forma di uno spettrogramma a cascata (waterfall), che riporta il time stamp in ascissa e la frequenza in ordinata. Dal momento che la banda visibile istantanea è limitata, quando la risposta in frequenza arriva al limite superiore o inferiore, il software effettua il "mirroring", ribaltando la risposta. Occorre tenere conto di questo aspetto quando si calcola il Doppler ricevuto. Nella sezione successiva del rapporto, le misure presentate saranno suddivise per giornata.

Misure del 25-09-2019

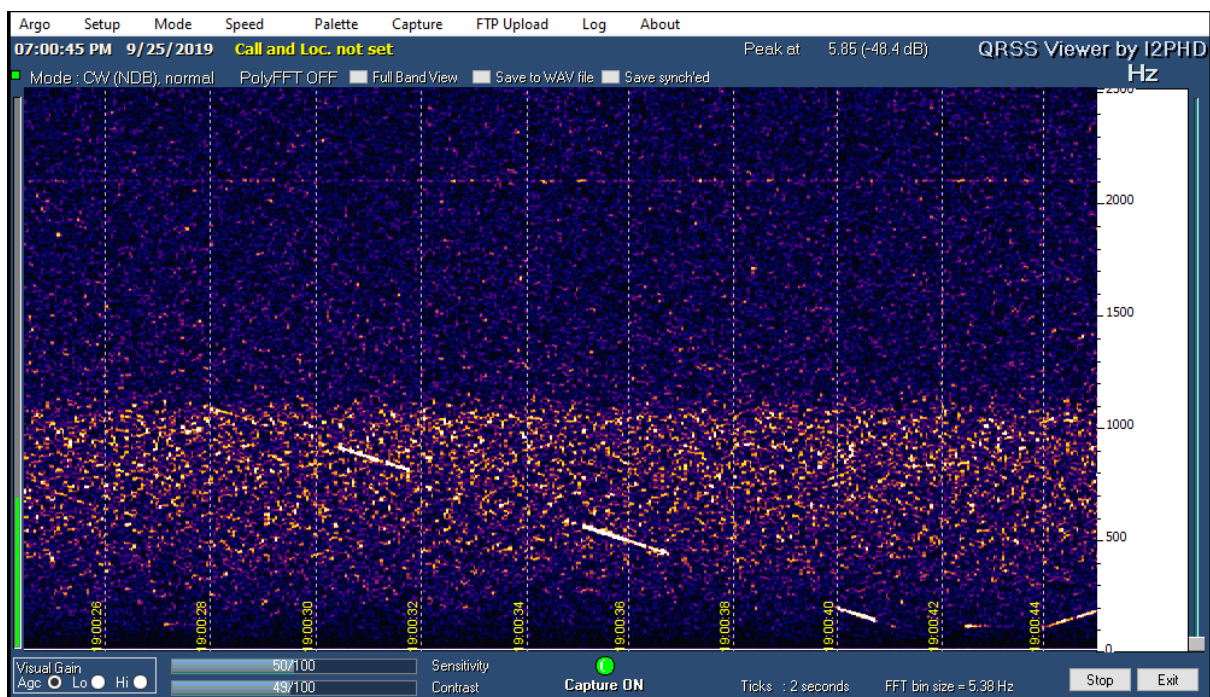
In Tabella II, sono stati riportati i puntamenti nella finestra di osservabilità, della durata totale di 60 secondi, 30 secondi prima e 30 secondi dopo l'istante di passaggio favorevole (che, ricordiamo, è quello per cui si ha l'elevazione di puntamento in ricezione più alta possibile in cui l'oggetto è all'interno del fascio del GRAVES), per la giornata di misure del 25 Settembre 2019. I tempi sono forniti in formato UTC.

Tabella II. Finestra di osservabilità della ISS durante il passaggio favorevole del 25/09/2019.

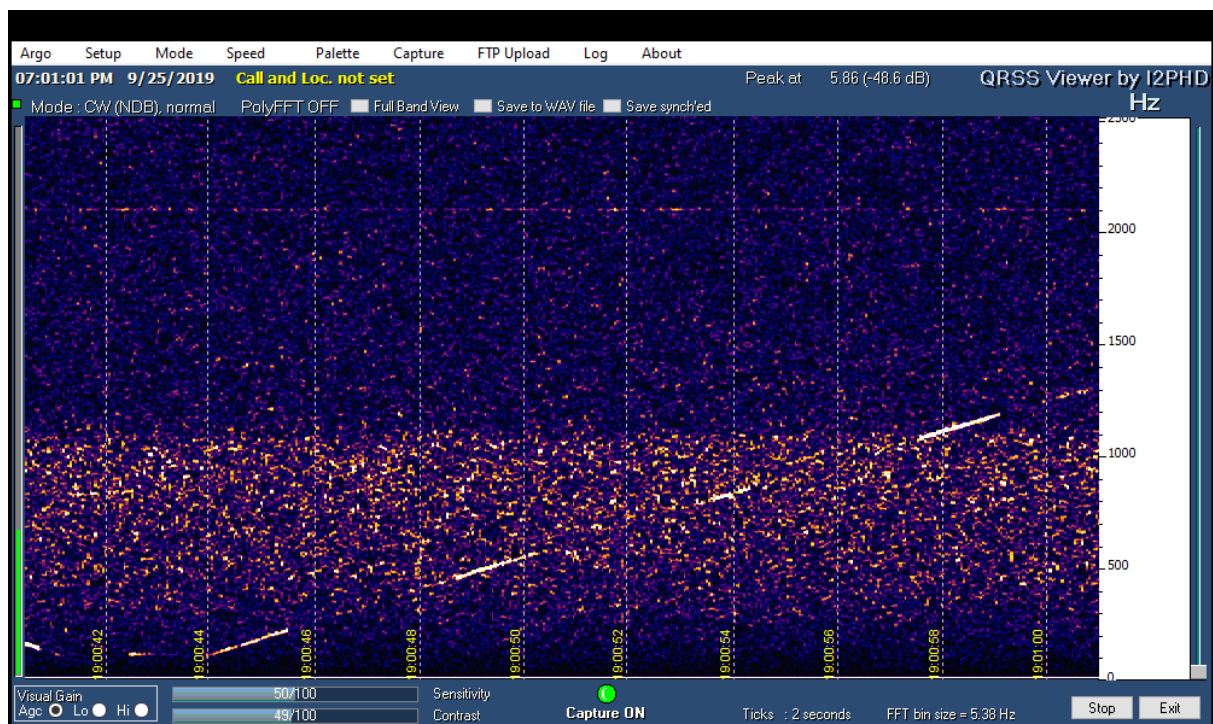
TIME (UTC)	16:59:56	17:00:01	17:00:06	17:00:11	17:00:16	17:00:21	17:00:26	17:00:31	17:00:36	17:00:41	17:00:46	17:00:51	17:00:56
Azimuth (°)	286,7	291,4	296,5	302,3	308,5	315,2	322,2	329,2	336,1	342,8	348,9	354,6	359,7
Elevation (°)	46,8	48,5	50,1	51,5	52,6	53,4	53,8	53,8	53,3	52,5	51,3	49,9	48,3

In figura 11 vengono mostrati gli spettrogrammi acquisiti durante il passaggio della ISS del 25 Settembre. Come si può notare dalla figura la "strisciata Doppler" del passaggio è discontinua. Questo è dovuto alla modulazione nel puntamento del GRAVES già descritto nella sezione introduttiva, che introduce un intervallo di "buio" (inteso come intervallo di non-illuminazione) che dura approssimativamente da 1 a 3 secondi. Si noti anche l'effetto di "mirroring", già descritto in precedenza, all'istante 19:00:42, per effetto del quale il segnale viene ribaltato. Il segnale specchiato deve essere considerato a tutti gli effetti una continuazione del segnale originale. In figura 12, viene mostrato un confronto tra il Doppler stimato e quello misurato, dal quale si evince una buona precisione delle stime iniziali. Il fatto che la curva stimata sia più bassa è probabilmente legato alla approssimazione del raggio terrestre nelle simulazioni. Gli spettrogrammi acquisiti sono stati combinati in figura 13, nella quale è possibile vedere l'intero passaggio. A differenza dei singoli fotogrammi, tuttavia, si noti come in ordinata non è stata riportata la frequenza nominale della banda

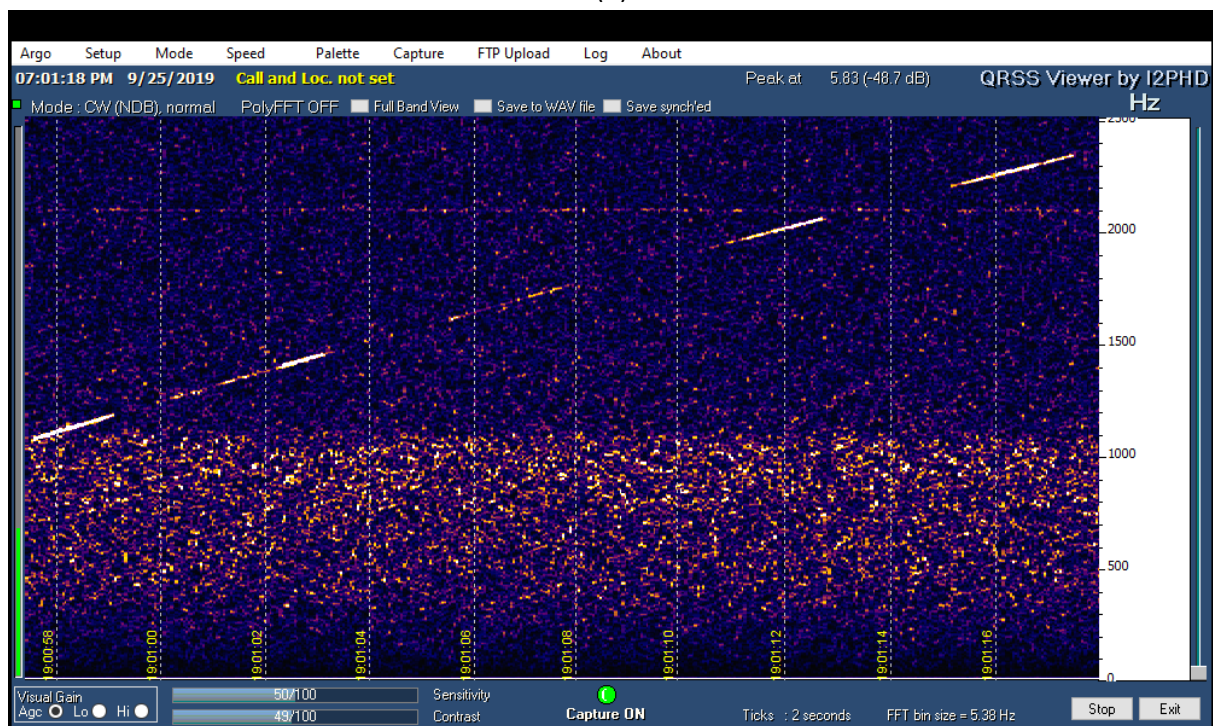
audio del ricevitore (200-2700 Hz), ma direttamente il valore Doppler associato. La corrispondenza fra questi due valori è stata ricavata acquisendo un segnale con un shift in frequenza di 1 kHz rispetto alla portante del GRAVES e stabilendo a quale valore in banda audio corrispondesse. Tale valore risulta essere pari a 845 Hz, traslando perciò le scale di $(1000-845) \text{ Hz} = 155 \text{ Hz}$ si ottiene il Doppler corrispondente. Per aiutare la lettura del Doppler sono state create due scale di valori di frequenza, la prima, in alto, è relativa alla parte “discendente” della strisciata Doppler, la seconda, in basso, tiene conto del ribaltamento ed è relativa alla parte “ascendente” del Doppler. Inoltre, per ogni time stamp sono stati riportati i puntamenti in azimuth e elevazione. Infine, in Tabella III, viene riportata la velocità radiale (intesa come componente della velocità della ISS lungo il segmento ρ_{RX} di figura 9) sia in componenti vettoriali che in modulo nel sistema di riferimento Earth Centered Earth Fixed (ECEF), su tutta la finestra di acquisizione a intervalli di 4 secondi. I valori di velocità sono stati calcolati con un algoritmo in Matlab e saranno utili in ambito data fusion, se incrociati con i valori ottenuti dalle osservazioni ottiche.



(a)



(b)



(c)

Figura 11. Schermate di acquisizione dell'eco Doppler della ISS nella giornata 25/09/2019: a) dalle 19:00:26 alle 19:00:44, b) dalle 19:00:44 alle 19:01:00, c) dalle 19:01:00 alle 19:01:17.

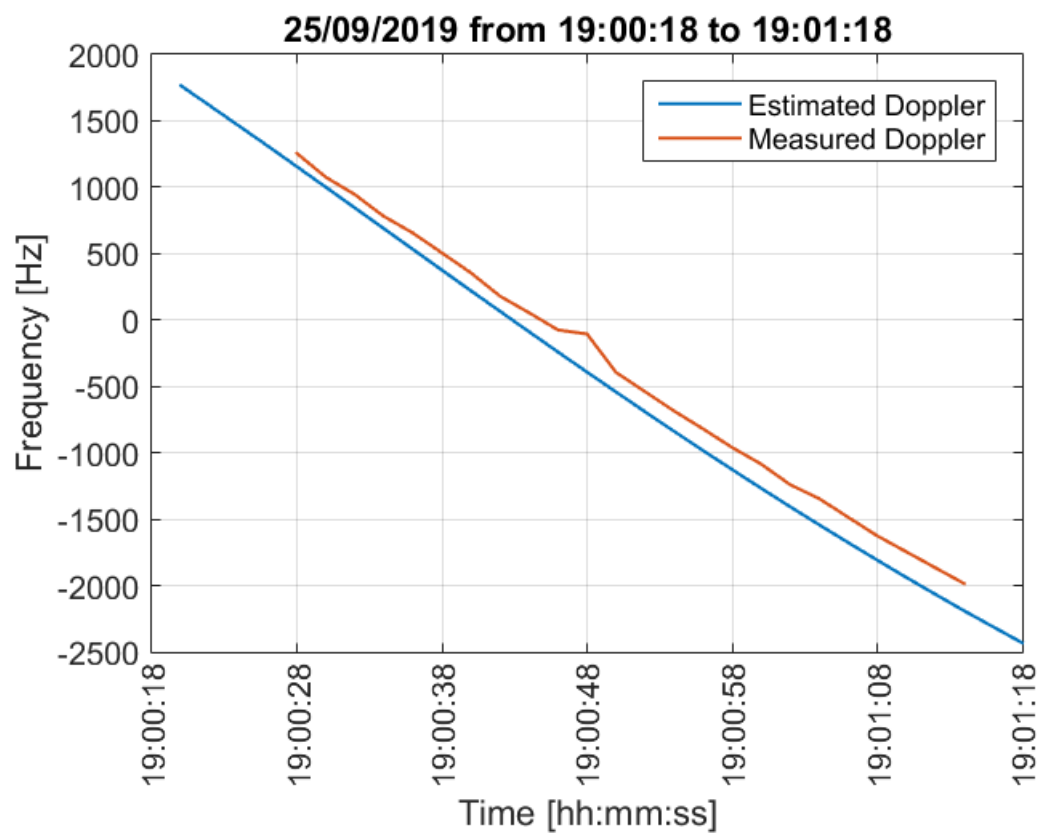


Figura 12. Confronto fra Doppler stimato e Doppler misurato su tutto il tempo di acquisizione per la misura del 25/09/2019.

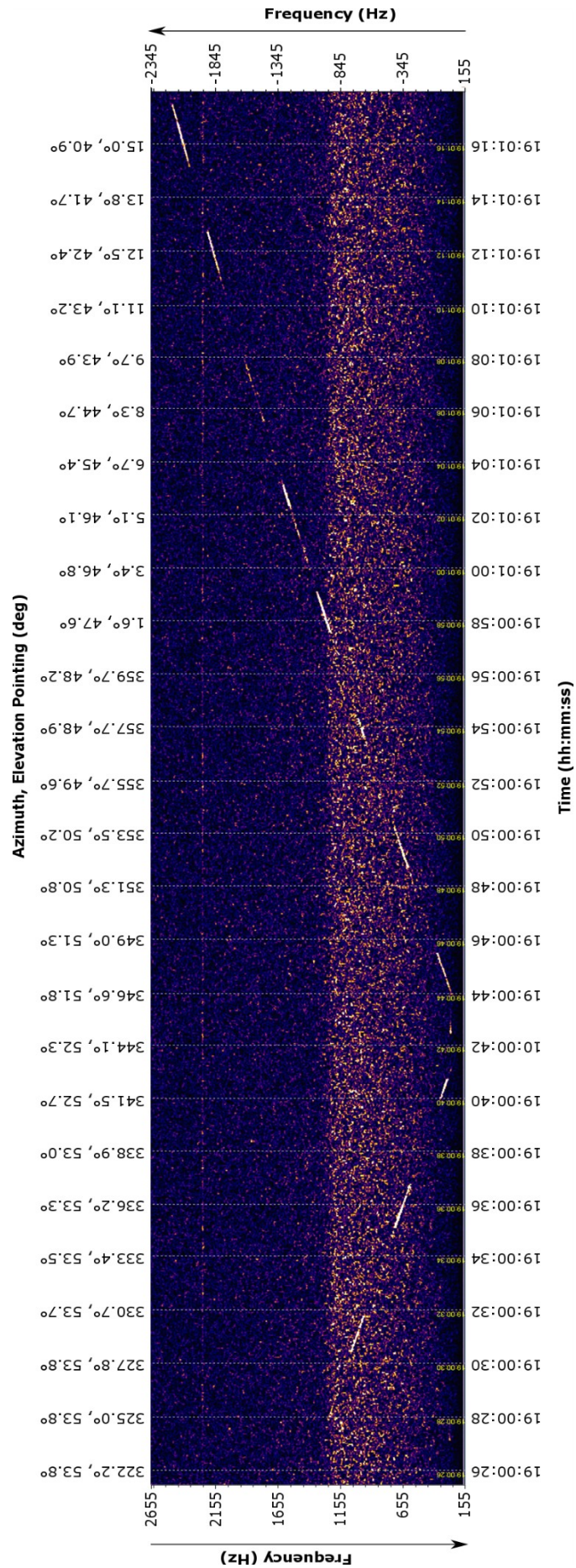


Figura 13. Doppler completo del passaggio della ISS del 25/09/2019.

Tabella III. Componenti ECEF della velocità radiale della ISS, in funzione di tempo, puntamento e Doppler per la misura del 25/09/2019.

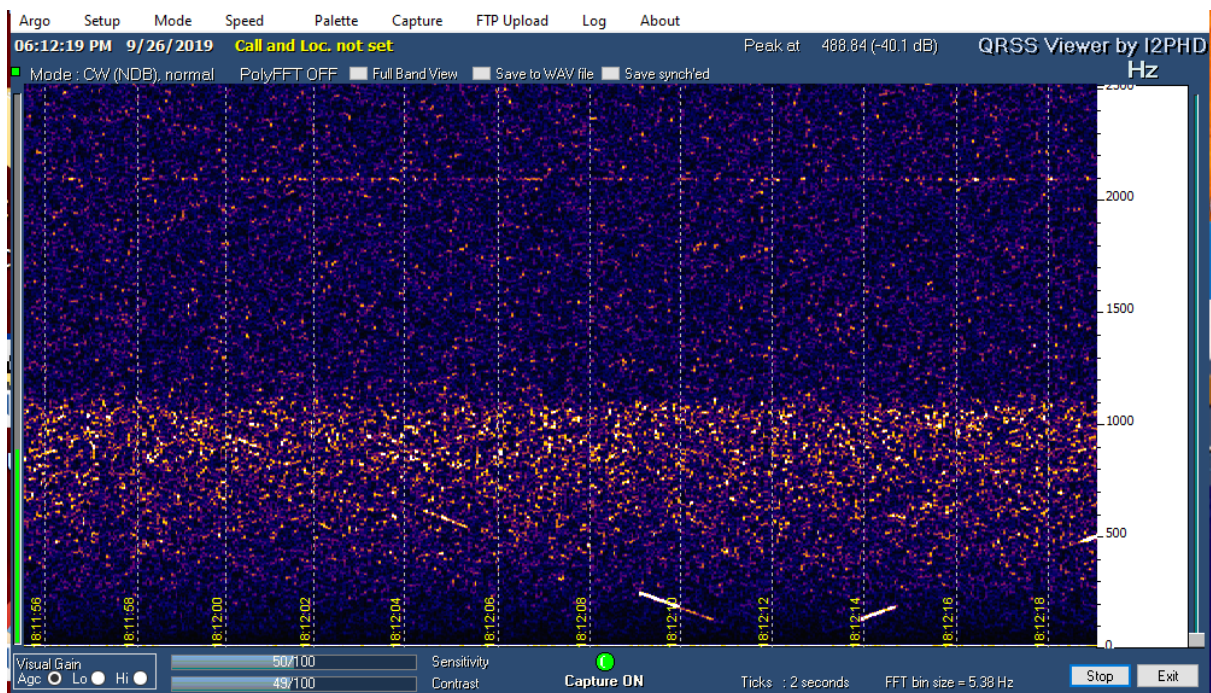
Time	19:00:30	19:00:34	19:00:38	19:00:42	19:00:46	19:00:50	19:00:54	19:00:58	19:01:02	19:01:06	19:01:10	19:01:14
Azimuth (°)	327.8	333.4	338.9	344.1	349.0	353.5	357.7	1.6	5.1	8.3	11.1	13.8
Elevation (°)	53.8	53.5	53.0	52.3	51.3	50.2	48.9	47.6	46.1	44.7	43.2	41.7
Doppler (Hz)	1075	780	505	180	-75	-395	-685	-960	-1240	-1485	-1745	-1985
Vrad_x (km/s)	0.093	0.221	0.320	0.389	0.430	0.444	0.432	0.397	0.342	0.270	0.185	0.089
Vrad_y (km/s)	-0.062	-0.130	-0.160	-0.152	-0.109	-0.034	0.067	0.192	0.335	0.492	0.658	0.832
Vrad_z (km/s)	0.238	0.631	1.032	1.432	1.825	2.204	2.563	2.899	3.208	3.491	3.745	3.971
 Vrad (km/s) 	0.263	0.6813	1.092	1.492	1.878	2.248	2.600	2.932	3.244	3.535	3.807	4.058

Misure del 26-09-2019

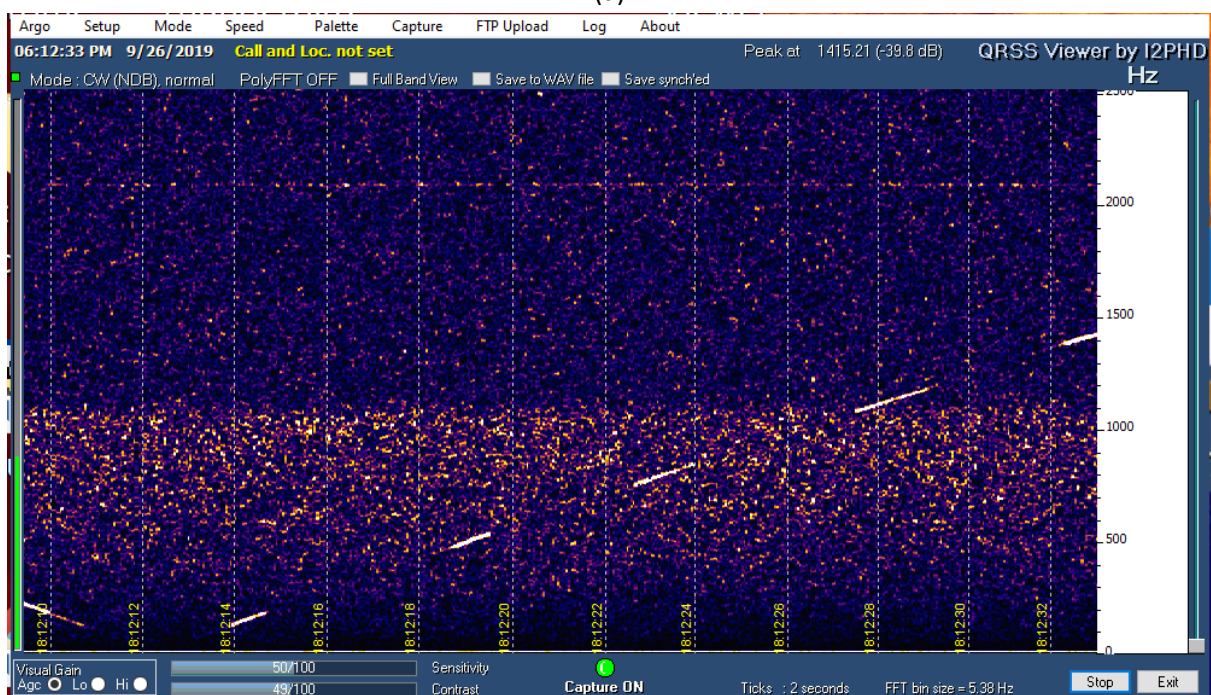
Analogamente a quanto descritto per le misure del 25 Settembre, nel seguito si riportano i risultati della misurazione del Doppler della ISS effettuata il 26/09/2019.

Tabella IV. Finestra di osservabilità della ISS durante il passaggio favorevole del 26/09/2019.

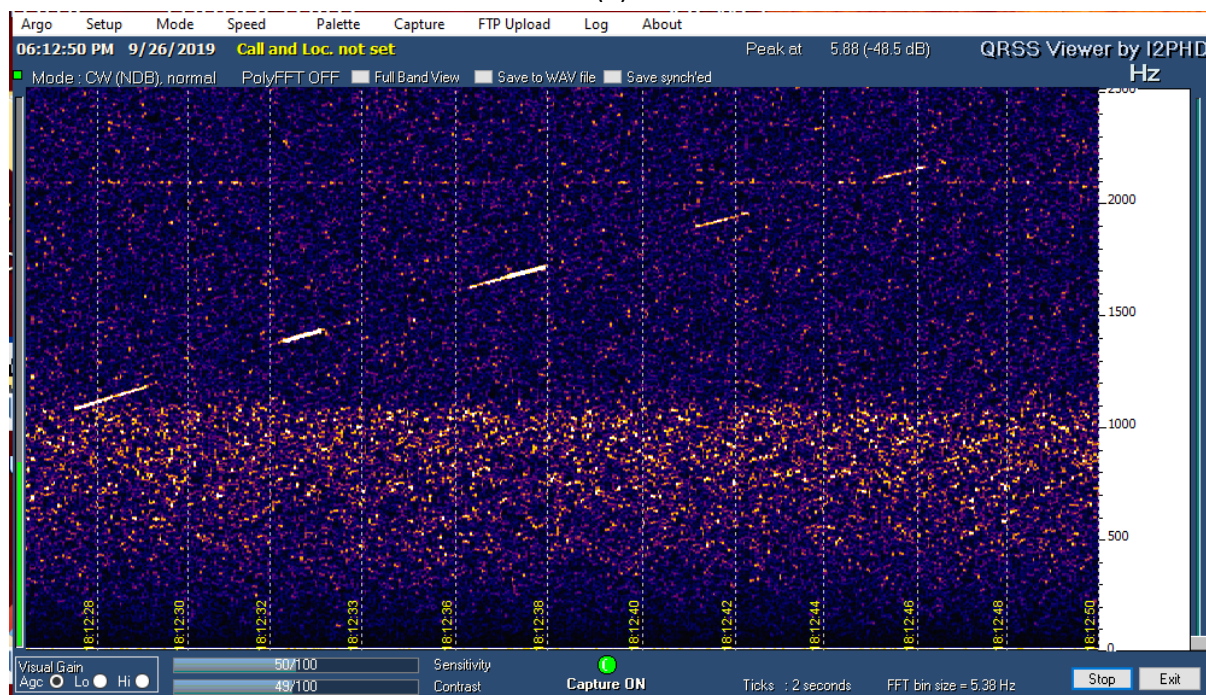
TIME (UTC)	16:11:29	16:11:34	16:11:39	16:11:44	16:11:49	16:11:54	16:11:59	16:12:04	16:12:09	16:12:14	16:12:19	16:12:24	16:12:29
Azimuth (°)	220,6	218,6	215,7	211,1	202,6	184,0	141,5	98,4	79,4	70,7	66,0	63,1	61,1
Elevation (°)	61,3	65,4	69,7	74,1	78,5	82,5	84,5	82,6	78,6	74,2	69,8	65,5	61,5



(a)



(b)



(c)

Figura 14. Schermate di acquisizione dell'eco Doppler della ISS nella giornata 26/09/2019: a) dalle 18:11:56 alle 18:12:18, b) dalle 18:12:18 alle 18:12:32, c) dalle 18:12:32 alle 18:12:50.

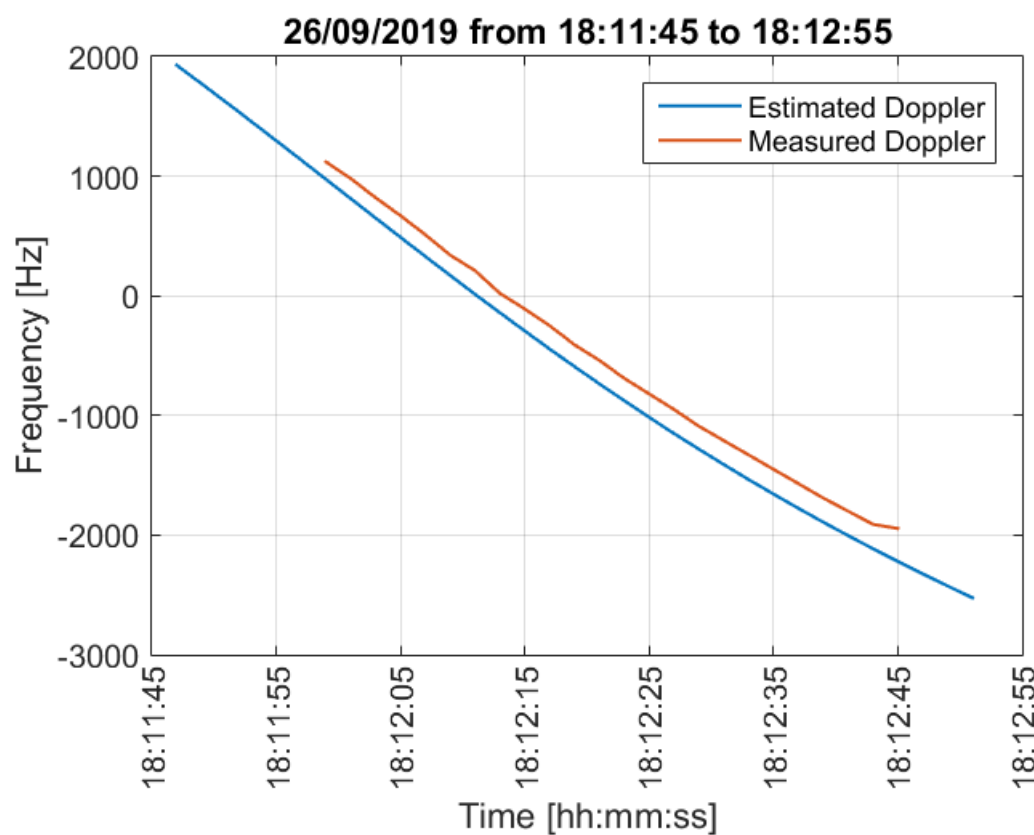


Figura 15. Confronto fra Doppler stimato e Doppler misurato su tutto il tempo di acquisizione per la misura del 26/09/2019.

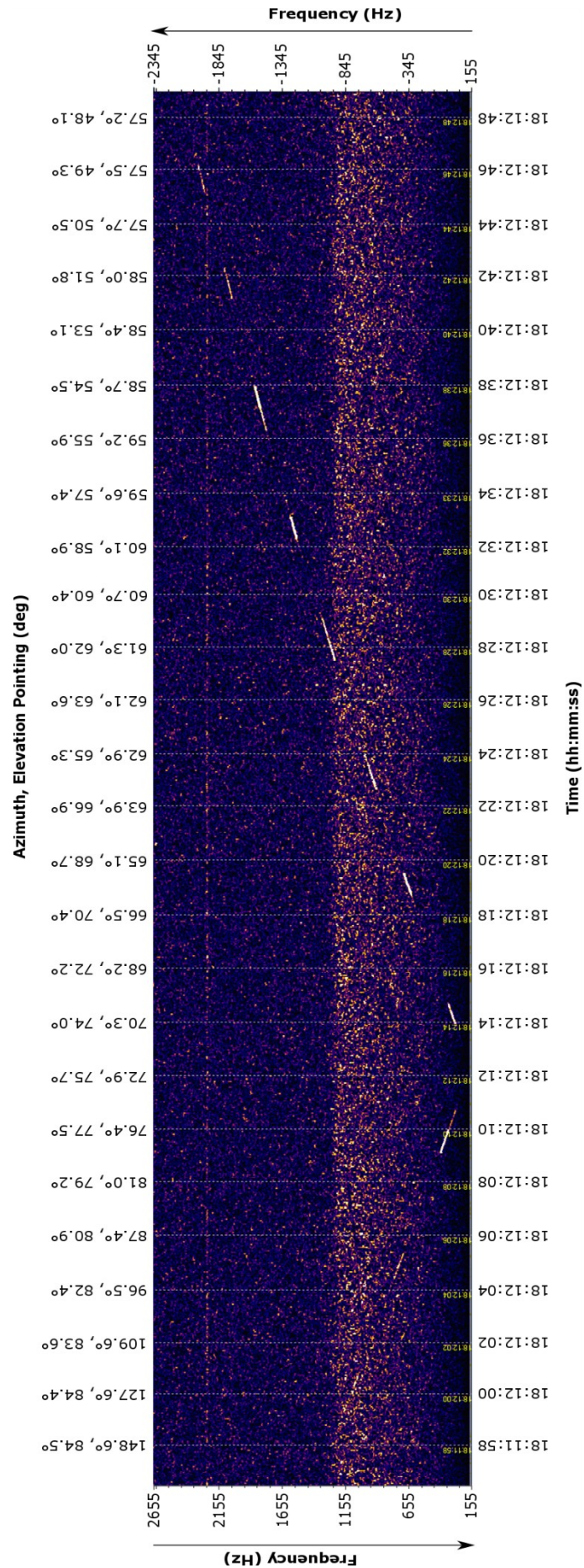


Figura 16. Doppler completo del passaggio della ISS del 26/09/2019.

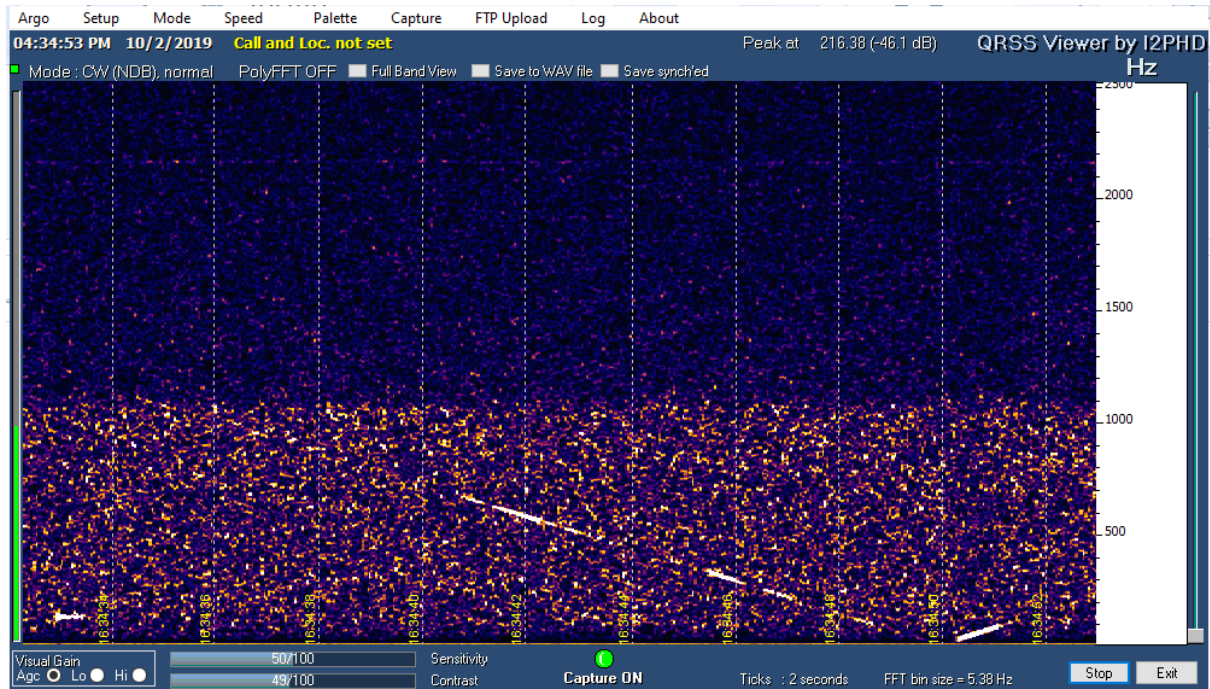
Tabella V. Componenti ECEF della velocità radiale della ISS, in funzione di tempo, puntamento e Doppler per la misura del 26/09/2019.

Time	18:12:01	18:12:05	18:12:09	18:12:13	18:12:17	18:12:21	18:12:25	18:12:29	18:12:33	18:12:37	18:12:41	18:12:45
Azimuth (°)	121.0	93.1	79.4	72.0	67.6	64.7	62.7	61.1	60.0	59.0	58.3	57.7
Elevation (°)	84.2	81.9	78.6	75.1	71.6	68.1	64.7	61.5	58.4	55.4	52.7	50.1
Doppler (Hz)	980	670	340	20	-250	-540	-820	-1090	-1330	-1570	-1800	-1945
Vrad_x (km/s)	0.350	0.698	0.992	1.227	1.402	1.518	1.580	1.595	1.567	1.505	1.416	1.304
Vrad_y (km/s)	0.113	0.283	0.492	0.734	0.999	1.278	1.563	1.847	2.124	2.391	2.643	2.879
Vrad_z (km/s)	0.264	0.584	0.922	1.267	1.609	1.941	2.256	2.549	2.817	3.058	3.273	3.463
 Vrad (km/s) 	0.453	0.953	1.441	1.910	2.356	2.776	3.167	3.528	3.860	4.163	4.439	4.689

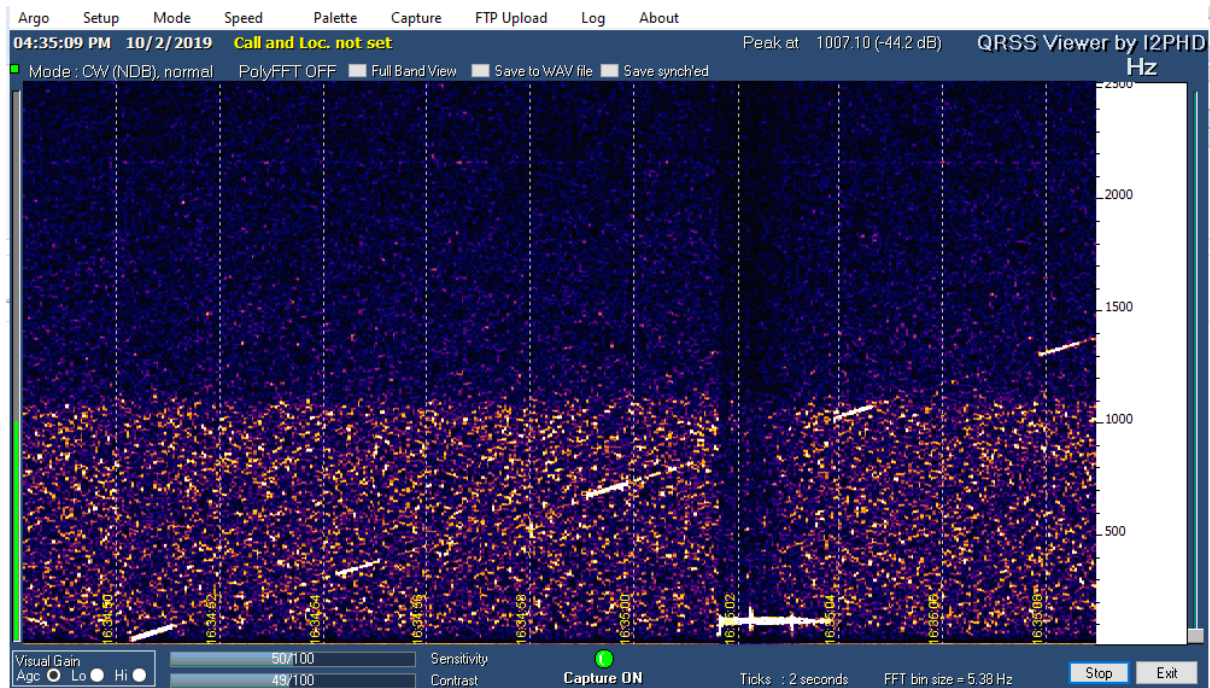
Misure del 02/10/2019

Tabella VI. Finestra di osservabilità della ISS durante il passaggio favorevole del 02/10/2019.

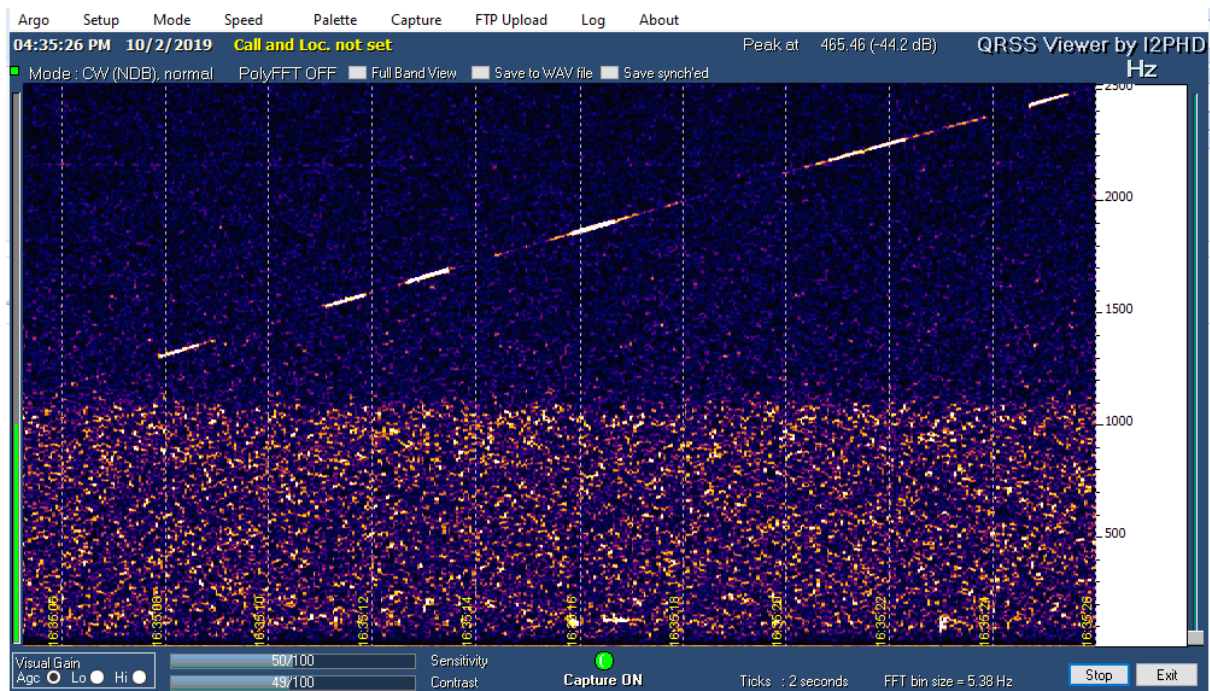
TIME (UTC)	14:34:00	14:34:05	14:34:10	14:34:15	14:34:20	14:34:25	14:34:30	14:34:35	14:34:40	14:34:45	14:34:50	14:34:55	14:35:00
Azimuth (°)	302,6	306,0	309,6	313,4	317,3	321,2	325,3	329,4	333,5	337,5	341,4	345,2	348,9
Elevation (°)	34,5	35,3	36,0	36,6	37,0	37,4	37,6	37,6	37,5	37,2	36,8	36,3	35,6



(a)



(b)



(c)

Figura 17. Schermate di acquisizione dell'eco Doppler della ISS nella giornata 02/10/2019: a) dalle 16:34:34 alle 16:34:52, b) dalle 16:34:52 alle 16:35:08, c) dalle 16:35:08 alle 16:35:26.

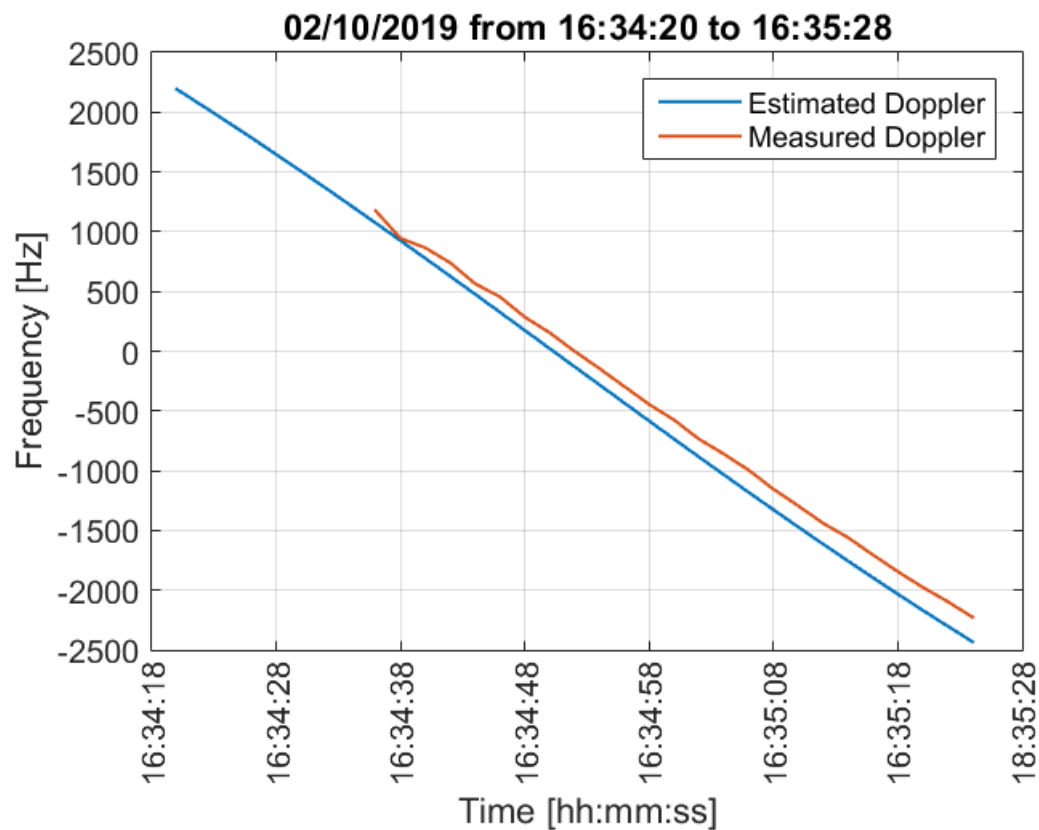


Figura 18. Confronto fra Doppler stimato e Doppler misurato su tutto il tempo di acquisizione per la misura del 02/10/2019.

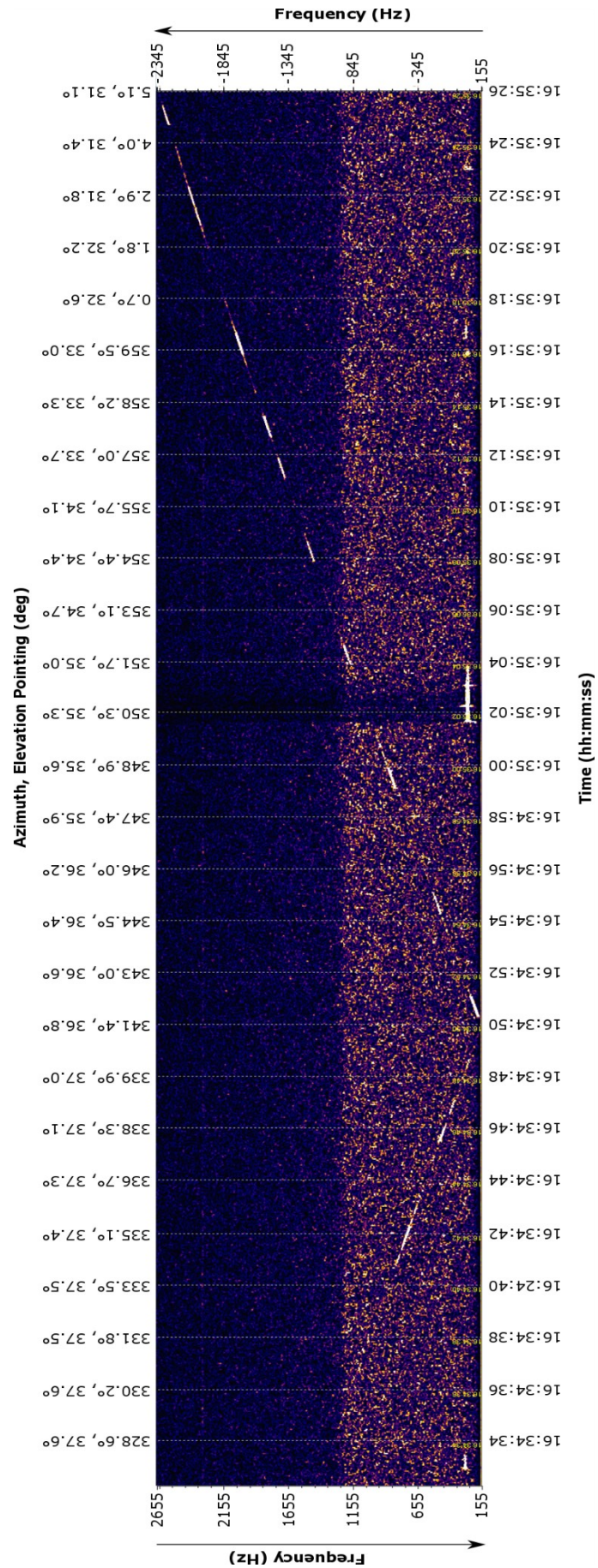


Figura 19. Doppler completo del passaggio della ISS del 02/10/2019.

Tabella VII. Componenti ECEF della velocità radiale della ISS, in funzione di tempo, puntamento e Doppler per la misura del 02/10/2019.

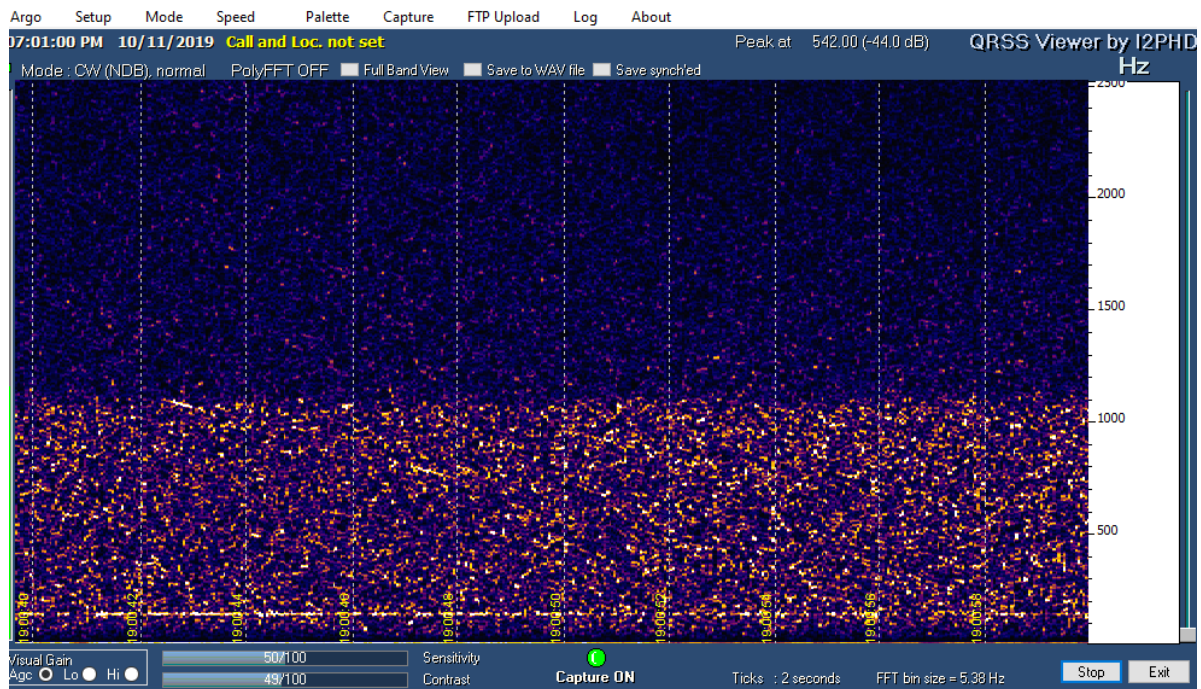
Time	16:34:36	16:34:40	16:34:44	16:34:48	16:34:52	16:34:56	16:35:00	16:35:04	16:35:08	16:35:12	16:35:16	16:35:20	16:35:24
Azimuth (°)	330.2	333.5	336.7	339.9	343.0	346.0	348.9	351.7	354.4	357.0	359.5	1.8	4.0
Elevation (°)	37.6	37.5	37.3	37.0	36.6	36.2	35.6	35.0	34.4	33.7	33.0	32.2	31.4
Doppler (Hz)	1175	865	565	285	0	-295	-575	-860	-1155	-1440	-1705	-1975	-2225
Vrad_x (km/s)	0.017	0.041	0.050	0.044	0.025	-0.007	-0.052	-0.107	-0.172	-0.246	-0.326	-0.412	-0.503
Vrad_y (km/s)	-0.059	-0.161	-0.237	-0.287	-0.313	-0.314	-0.292	-0.249	-0.187	-0.109	-0.016	0.089	0.204
Vrad_z (km/s)	0.151	0.461	0.777	1.094	1.409	1.718	2.019	2.308	2.583	2.843	3.086	3.311	3.519
Vrad (km/s)	0.163	0.491	0.813	1.132	1.443	1.747	2.040	2.324	2.595	2.855	3.103	3.338	3.561

Misure del 11/10/2019

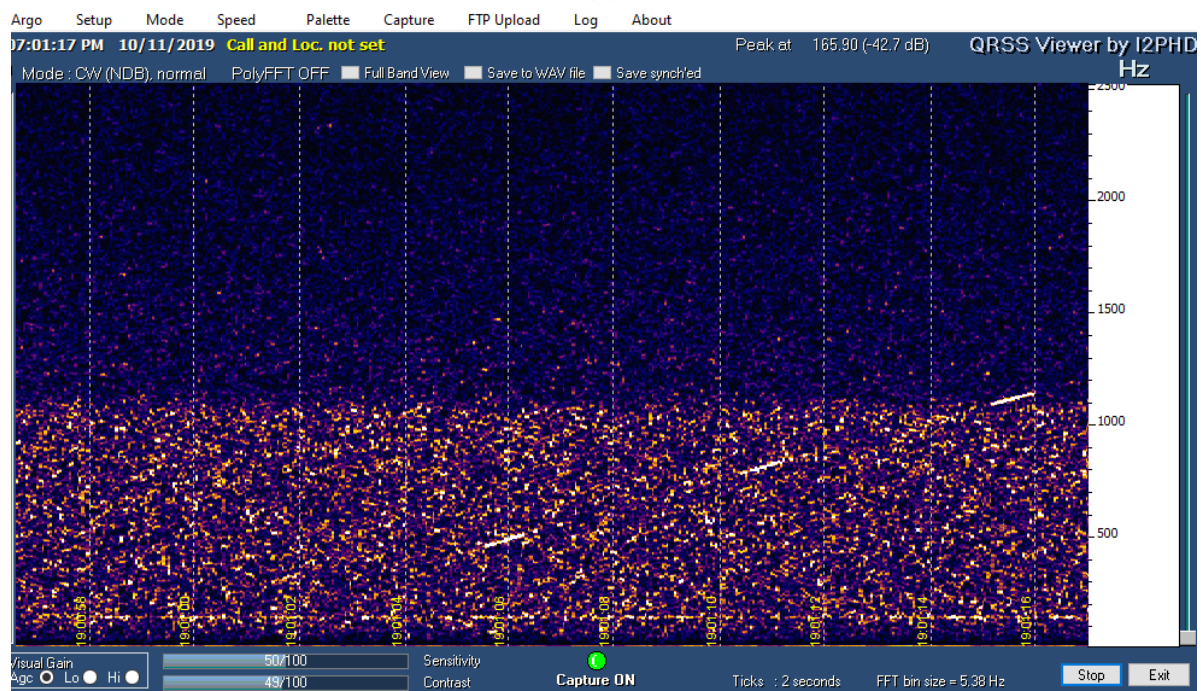
Considerando che dalle previsioni il Doppler relativo a questo passaggio risultava negativo (circa -2.5 kHz), il sistema è stato calibrato in maniera differente rispetto alle precedenti misurazioni.

Tabella VIII. Finestra di osservabilità della ISS durante il passaggio favorevole del 11/10/2019.

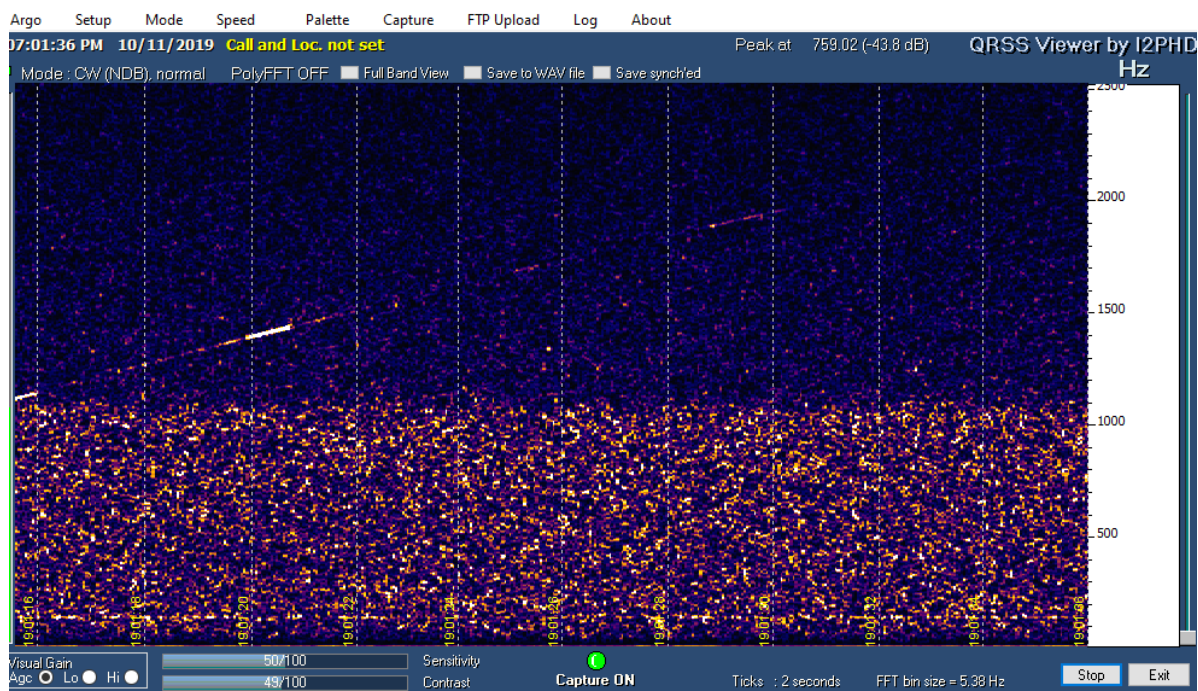
TIME (UTC)	17:00:33	17:00:38	17:00:43	17:00:48	17:00:53	17:00:58	17:01:03	17:01:08	17:01:13	17:01:18	17:01:23	17:01:28	17:01:33
Azimuth (°)	295,2	292,5	288,7	282,6	272,3	252,8	219,0	185,5	166,2	155,9	149,9	146,1	143,5
Elevation (°)	61,0	65,0	69,2	73,4	77,5	80,9	82,4	80,9	77,4	73,3	69,1	64,9	60,9



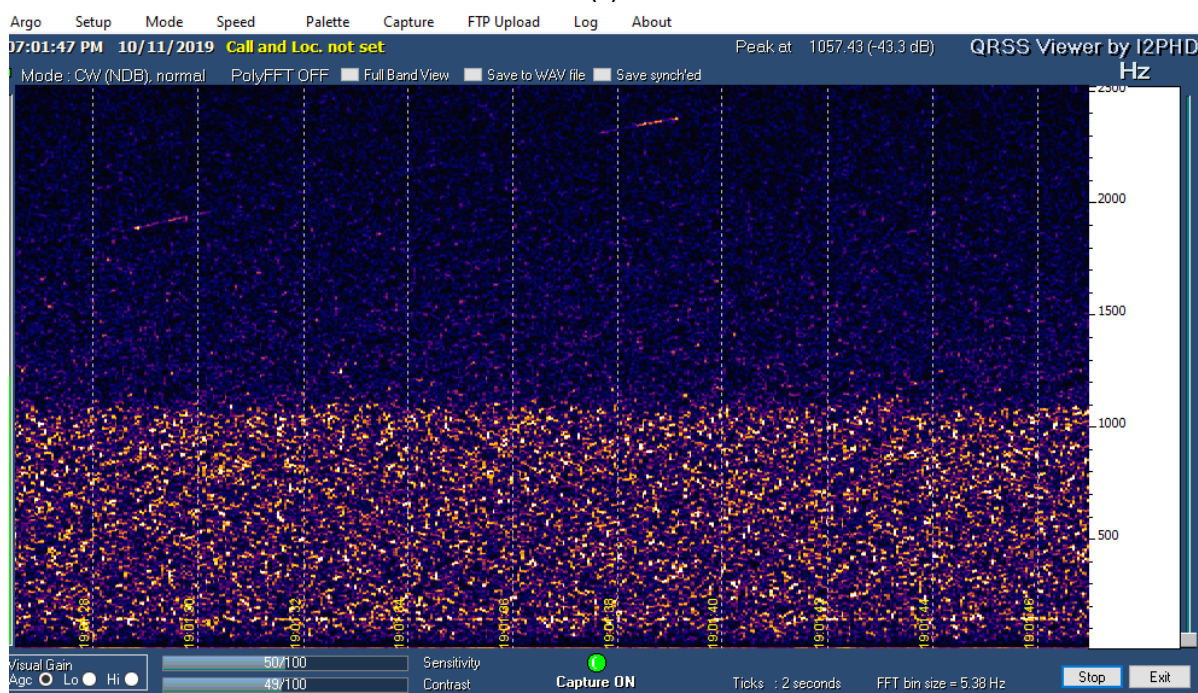
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 20. Schermate di acquisizione dell'eco Doppler della ISS nella giornata 11/10/2019: a) dalle 19:00:40 alle 19:00:58, b) dalle 19:00:58 alle 19:01:16, c) dalle 19:01:16 alle 19:01:34, d) dalle 19:01:34 alle 19:01:46.

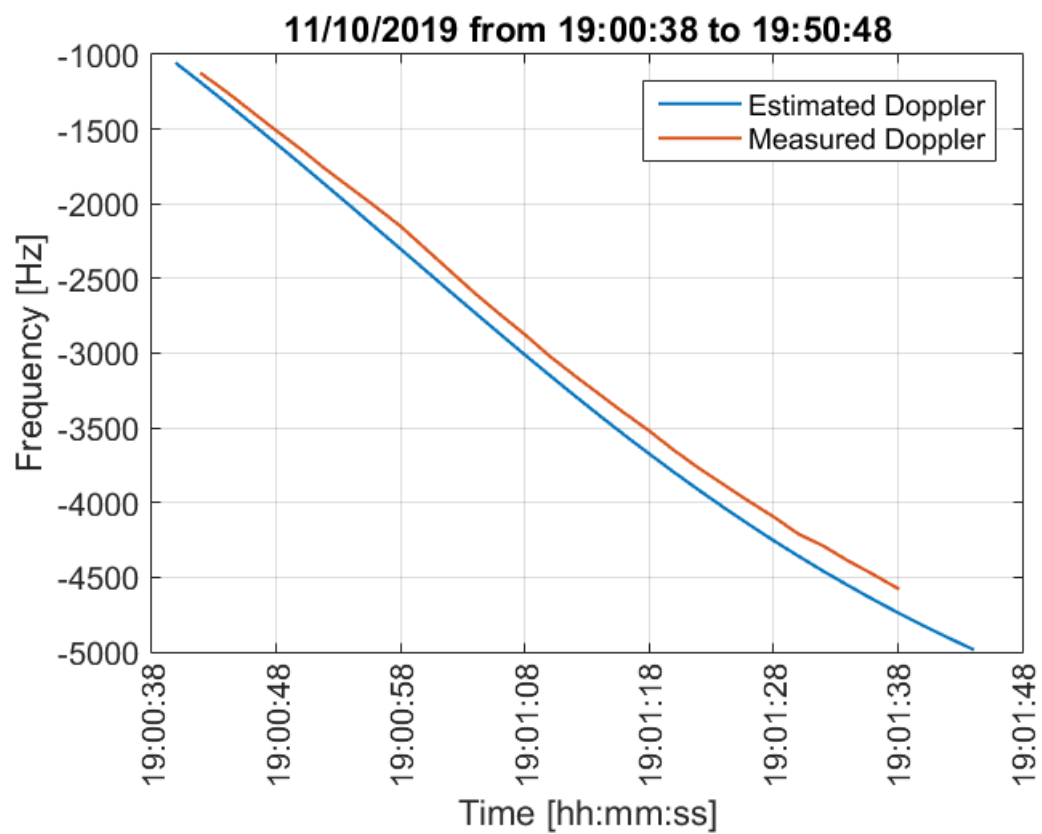


Figura 21. Confronto fra Doppler stimato e Doppler misurato su tutto il tempo di acquisizione per la misura del 02/10/2019.

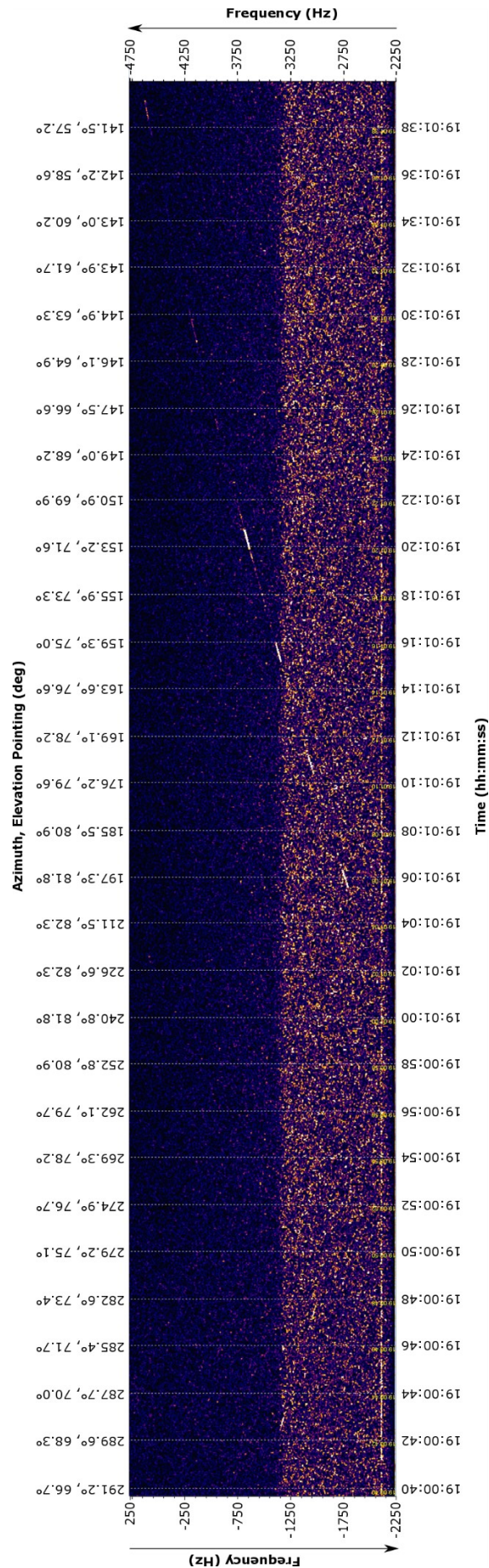


Figura 22. Doppler completo del passaggio della ISS del 11/10/2019.

Tabella IX. Componenti ECEF della velocità radiale della ISS, in funzione di tempo, puntamento e Doppler per la misura del 11/10/2019.

Time	19:00:50	19:00:54	19:00:58	19:01:02	19:01:06	19:01:10	19:01:14	19:01:18	19:01:22	19:01:26	19:01:30	19:01:34	19:01:38
Azimuth (°)	279.2	269.4	252.8	226.6	197.3	176.2	163.6	155.9	150.9	147.5	144.9	143.0	141.5
Elevation (°)	75.1	78.2	80.9	82.3	81.8	79.6	76.6	73.3	69.9	66.6	63.3	60.2	57.2
Doppler (Hz)	-1635	-1895	-2150	-2450	-2740	-3020	-3275	-3520	-3770	-3990	-4210	-4390	-4575
Vrad_x (km/s)	-1.111	-0.772	-0.394	0.014	0.440	0.873	1.300	1.709	2.093	2.443	2.756	3.031	3.267
Vrad_y (km/s)	0.152	0.045	-0.006	0.001	0.068	0.192	0.366	0.583	0.833	1.107	1.395	1.689	1.982
Vrad_z (km/s)	-0.969	-0.623	-0.294	0.009	0.277	0.502	0.680	0.808	0.889	0.924	0.919	0.879	0.810
Vrad (km/s)	1.482	0.994	0.492	0.017	0.525	1.025	1.512	1.979	2.421	2.837	3.223	3.579	3.906

Conclusioni

Dai dati presentati nel report si evince che gli echi dei passaggi della ISS sono stati tutti correttamente ricevuti con una buona precisione delle stime riguardanti i tempi di passaggio e dei valori della curva di Doppler, effettuate in via preventiva ai passaggi schedati. Visti i risultati, il sistema descritto potrebbe essere utilizzato per la detection di oggetti di dimensione considerevolmente minori rispetto alla stazione spaziale internazionale, quali ad esempio detriti spaziali di grandi dimensioni (approssimativamente oltre i 10 metri quadrati di sezione radar).