



ALMA MATER STUDIORUM
UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

Dipartimento di Ingegneria industriale

Corso di Laurea in
INGEGNERIA AEROSPAZIALE

**Analisi di Opportunità per
Esperimenti
di Radar Bistatico su Callisto
Durante la Missione JUICE**

Tesi di Laurea in
ING-IND/05: Fondamenti di Meccanica Orbitale

Relatore

Prof. Paolo Tortora

Presentata da

Cristian Campagna

Correlatore

Dott. Giancorrado Brighi

Sommario

A partire dal 2031, la missione JUICE entrerà in orbita attorno a Giove dando inizio alla sua fase scientifica. Tra i numerosi esperimenti che la sonda compirà, vi sarà l'esperimento di radio scienza 3GM, che ha la capacità tecnica di operare anche esperimenti di radar bistatico. Lo studio proposto è volto a determinare in quali fly-by di Callisto da parte di JUICE sia più vantaggioso operare uno o più esperimenti bistatici. Per farlo, si è lavorato sia sulla geometria del problema in funzione delle regioni di interesse geologico/scientifico di Callisto, che su uno studio del segnale riflesso in banda X. Si è osservato che vi siano diversi fly-by validi (sui 21 iniziali) per operare l'esperimento, ma che di questi, il lavoro ne prende in considerazione 3 particolarmente interessanti: C6, C7 e C11. I fly-by selezionati presentano il miglior equilibrio tra la distanza percorsa sulla traccia a terra, il tempo di osservazione con un SNDR superiore ad una soglia di 10 dBHz e l'illuminazione di zone di interesse scientifico/geologico. Tutti i fly-by hanno registrato finestre di osservabilità superiori ai 50 minuti, con distanze percorse di almeno 600 km. In queste finestre di osservazione nelle quali sarà possibile svolgere l'esperimento, le tracce a terra dei punti speculari attraverseranno regioni di forte interesse scientifico come bright terrains, bright ray craters, dark ancient terrains e impact craters. Ognuna di queste zone presenta delle caratteristiche peculiari significative per gli obiettivi proposti dalla missione. L'analisi di dati raccolti attraverso esperimenti di radar bistatico potrà permettere di caratterizzare al meglio le proprietà dello scattering di Callisto, al fine di determinare con maggiore precisione dati sulla rugosità superficiale, densità o sulla composizione del corpo celeste in esame.

Ringraziamenti

Desidero ringraziare il Professor Paolo Tortora, che mi ha dato l'opportunità di svolgere la tesi presso lo Radio Science and Planetary Exploration Laboratory. Il lavoro svolto durante il tirocinio e la tesi mi ha permesso di apprendere numerosi concetti e approfondire le conoscenze acquisite durante i miei studi. Un ringraziamento speciale va al Correlatore Dott. Giancorrado Brighi per il suo eccellente supporto. Mi ha guidato con dedizione durante tutto il percorso di tirocinio e tesi, sempre pronto ad aiutarmi e rispondere prontamente a qualsiasi mio dubbio. Ringrazio la mia famiglia, che mi è stata sempre vicina durante il mio percorso universitario, sostenendomi nei momenti difficili. Un ringraziamento speciale va a Nicole, la mia colonna, che ha sempre saputo riportare il sorriso nelle giornate in cui ero giù di morale. Infine, ringrazio i miei amici, che sono sempre stati presenti e, anche nei momenti in cui volevo mollare, mi hanno aiutato a non farlo e a rimanere sulla giusta strada.

Indice

1	Introduzione	1
2	JUICE: Missione ed Obiettivi	3
2.1	JUICE: SpaceCraft e Obiettivi missione	3
2.2	Fasi Della Missione JUICE	5
2.3	Sistema Gioviano	7
2.4	Morfologia di Callisto e Caratteristiche Principali	7
2.5	Fly-by di Callisto	9
3	Esperimento di Radar Bistatico	11
3.1	Funzionamento di un Esperimento Radar Bistatico	11
3.2	Potenza Ricevuta	13
3.3	Punto Speculare	15
3.4	Coefficienti di Fresnel	16
3.5	Rapporto Segnale-Rumore	18
4	Risultati Preliminari	19
4.1	Criteri di selezione e ipotesi	19
4.2	Fly-by C11	22
4.3	Fly-by C7	29
4.4	Fly-by C6	33
5	Conclusioni	37
	Conclusioni	37

Elenco delle figure

2.1	10 strumenti costituenti il payload della sonda JUICE. L'immagine proviene da [4]	4
2.2	Traiettoria della missione JUICE proiettata sul piano orbitale delle lune di Giove in prossimità della JOI, la manovra più delicata della missione. Figura presa da [9]	5
2.3	Mappatura delle zone di interesse scientifico per Callisto ricavata dalle immagini della sonda Galileo [12]. La mappa di Callisto utilizzata qui e nelle successive immagini della tesi è presa da [11]	8
3.1	Immagine esplicativa della geometria di un esperimento bistatico. E' possibile notare in Figura il \vec{t}' vettore trasmittente-punto speculare e \vec{r}' vettore punto speculare-ricevente. Mentre i vettori \vec{t} e \vec{r} sono quelli che hanno origine nel sistema inerziale di Callisto e vertice nelle rispettive trasmettenti e riceventi. Si trova poi $\varphi_{t'}$ cioè l'angolo di riflessione speculare. Nel lavoro per semplicità verrà chiamato φ	13
4.1	Istogramma che riporta in giallo la quantità di punti speculari, calcolati con passo di 1 minuto su 6 ore di arco temporale, provenienti dal primo criterio. In arancione la quantità di punti speculari derivanti dall'unione del primo e secondo criterio citati nel testo, calcolati con le stesse condizioni.	20
4.2	Coefficienti di Fresnel all'interno della forbice in rapporto agli angoli di incidenza	22
4.3	Traccia a terra dei punti speculari durante il fly-by C11. Questi sono evidenziati con colori diversi in base al diverso grado di soddisfacimento del criterio di merito basato sull'angolo di incidenza secondo le categorie introdotte all'inizio della sezione 4.2: Accettabile (verde), non accettabile (blu) e ottimo (rosso). La mappa di Callisto è presa dallo studio [12] riporta con riquadri di colori diversi le zone di interesse sulla superficie (si veda anche Figura 2.3)	23
4.4	Particolare della mappa di Callisto relativo alla fase del fly-by C11 dove il criterio sul rapporto tra riflettività è soddisfatto (punti verdi in Figura 4.3). Le zone di interesse evidenziate sono impact crater morphologies and catenae (rosa), dark ray, floor and halo craters (verde) e bright terrain/Grooves and fractures (giallo) [12].	24
4.5	grafico P_R in ambedue le polarizzazioni, rappresentato in funzione dell'angolo	24
4.6	Grafici di C11, delle potenze in funzione dello slant-range e dell'angolo e slant range in funzione del tempo	25

4.7	Parametri rilevanti durante il fly-by C11 mostrati su un intervallo di tempo di 6 ore ed espresso in termini di minuti dal closest approach. (in alto) SNDR. (centro) Angoli di incidenza. (in basso) slant-range.	26
4.8	Il primo grafico rappresenta gli SNDR rispettivi ai punti speculari del fly-by C11 con intensità maggiore di 10dBHz nel tempo di osservazione. Il secondo grafico mostra l'andamento dello slant-range in funzione del tempo, sempre rispetto ai punti con intensità maggiore di 10dBHz. Compagnono delle zone in arancione, che indicano occultazione geometrica e zone in verde le quali indicano le finestre in cui il rapporto delle riflettività nelle due polarizzazioni si trova all'interno del range descritto nei criteri 4.1. In azzurro tratteggiato troviamo invece da quale minuto lo slant-range supera i 30000km	27
4.9	Coefficienti di Fresnel rappresentati in funzione dell'angolo	29
4.10	Grafici che mostrano l'andamento della potenza di C7 in funzione dei diversi parametri	29
4.11	Traccia a terra dei punti speculari durante il fly-by C7. Questi sono evidenziati con colori diversi in base al diverso grado di soddisfacimento del criterio di merito basato sull'angolo di incidenza secondo le categorie introdotte all'inizio della sezione 4.2: Accettabile (verde), non accettabile (blu) e ottimo (rosso). La mappa di Callisto è presa dallo studio [12] riporta con riquadri di colori diversi le zone di interesse sulla superficie (si veda anche Figura 2.3)	30
4.12	Parametri rilevanti durante il fly-by C7 mostrati su un intervallo di tempo di 6 ore ed espresso in termini di minuti dal closest approach. (in alto) SNDR. (centro) Angoli di incidenza. (in basso) slant-range.	31
4.13	Il primo grafico rappresenta gli SNDR rispettivi ai punti speculari del fly-by C7 con intensità maggiore di 10dBHz nel tempo di osservazione. Il secondo grafico mostra l'andamento dello slant-range in funzione del tempo, sempre rispetto ai punti con intensità maggiore di 10dBHz. Compagnono delle zone in arancione, che indicano occultazione geometrica e zone in verde le quali indicano le finestre in cui il rapporto delle riflettività nelle due polarizzazioni si trova all'interno del range descritto nei criteri 4.1. In azzurro tratteggiato troviamo invece da quale minuto lo slant-range supera i 30000 km	32
4.14	Soddisfacimento dei criteri di merito dell'osservazione bistatica riportati sulla traccia a terra del punto speculare durante il fly-by C7	32
4.15	Coefficienti di Fresnel in funzione dell'angolo di incidenza per il fly-by C6	33
4.16	Grafici che mostrano l'andamento della potenza di C6 in funzione dei diversi parametri	33
4.17	Traccia a terra dei punti speculari durante il fly-by C6. Questi sono evidenziati con colori diversi in base al diverso grado di soddisfacimento del criterio di merito basato sull'angolo di incidenza secondo le categorie introdotte all'inizio della sezione 4.2: Accettabile (verde), non accettabile (blu) e ottimo (rosso). La mappa di Callisto è presa dallo studio [12] riporta con riquadri di colori diversi le zone di interesse sulla superficie (si veda anche Figura 2.3)	34

4.18	Parametri rilevanti durante il fly-by C6 mostrati su un intervallo di tempo di 6 ore ed espresso in termini di minuti dal closest approach. (in alto) SNDR. (centro) Angoli di incidenza. (in basso) slant-range.	34
4.19	Il primo grafico rappresenta gli SNDR rispettivi ai punti speculari del fly-by C6 con intensità maggiore di 10dBHz nel tempo di osservazione. Il secondo grafico mostra l'andamento dello slant-range in funzione del tempo, sempre rispetto ai punti con intensità maggiore di 10 dBHz. Compiono delle zone in arancione, che indicano occultazione geometrica e zone in verde le quali indicano le finestre in cui il rapporto delle riflettività nelle due polarizzazioni si trova all'interno del range descritto nei criteri 4.1	35
4.20	Soddisfacimento dei criteri di merito dell'osservazione bistatica riportati sulla traccia a terra del punto speculare durante il fly-by C6	36

Elenco delle tabelle

2.1	Tabella fly-by di JUICE attorno a Callisto. I dati sono stati ricavati con passo temporale di 30 minuti circa, nell'intervallo di 1259 giorni di fase scientifica.	10
3.1	tabella dati tecnici JUICE [2]	14
5.1	Tabella riassuntiva dei fly-by analizzati nel dettaglio	37
5.2	Tabella che riporta i minuti osservabilità e la distanza percorsa dai punti speculari in rapporto ai criteri del paragrafo 4.1	38

Acronimi

ASI	Italian Space Agency
DART	Double Asteroid Redirection Test
DCO	Data Cut-Off
DSN	Deep Space Network
EME2000	Earth Mean Equator at J2000
EMO2000	Earth Mean Orbit at J2000
ESA	European Space Agency
FOV	Field of View
FPC	Flight Path Control
GNC	Guidance, Navigation and Control
G/S	Ground Station
INAF	Istituto Nazionale di Astrofisica
I/O	Input and Output
ISL	Inter-Satellite Link
JPL	Jet Propulsion Laboratory
LICIACube	Light Italian Cubesat for Imaging of Asteroids
LIDAR	LIght Detection And Ranging
MA	Mission Analysis
MCC	Mission Control Center
MOC	Mission Operations Center
MONTE	Mission-analysis and Operations Navigation Toolkit Environment
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NAV	Navigation

NEA	Near Earth Asteroid
NEO	Near Earth Object
OD	Orbit Determination
OM	Orbital Maneuver
OPNAV	Optical Navigation
PHA	Potentially Hazardous Asteroid
PL	Payload
PS	Propulsion System
RCS	Reaction Control System
RMS	Root Mean Square
RW	Reaction Wheel
S/C	spacecraft
SEP	Sun-Earth-Probe
SOC	Science Operations Center
SPA	Sun Phase Angle
SRP	Solar Radiation Pressure
SSB	Solar System Barycenter
SSDC	Space Science Data Center
STM	State Transition Matrix
TCA	Time of Closest Approach
UNIBO	University of Bologna
USO	Ultra Stable Oscillator
WVR	Water Vapour Radiometer

Capitolo 1

Introduzione

Nel 1610 il padre della fisica moderna Galileo Galilei scoprì l'esistenza delle quattro lune principali di Giove chiamandole con nomi appartenenti alla mitologia greca: Io, Europa, Ganimede e Callisto. Fu però solo dopo 3 secoli, intorno al 1979/80 che si ottennero le prime osservazioni ravvicinate, tramite lo straordinario lavoro delle sonde Voyager 1 e 2. In seguito a queste, venne prima la sonda Galileo e dopo quasi 20 anni arrivò Juno. Queste missioni hanno raccolto la maggior parte dei dati che conosciamo oggi sul sistema Giove. A questo punto, la comunità scientifica si trova di fronte ad una nuova sfida, data da un rinnovato interesse per i satelliti di Giove.

La missione JUICE, acronimo di JUpiter ICy moon Explorer, vuole dare una comprensione esaustiva sull'ambiente e sulle possibili condizioni di abitabilità del sistema gioviano, concentrandosi sull'osservazione delle lune ghiacciate di Giove. Ognuno di questi corpi celesti—Europa, Ganimede e Callisto—presenta diverse caratteristiche, la cui conoscenza contribuirà ad una migliore comprensione dei sistemi di satelliti orbitanti attorno a giganti gassosi e all'intero sistema solare tutto.

Callisto è una luna approssimativamente sferica. Essa possiede una composizione superficiale omogenea prevalentemente costituita da ghiaccio, priva di attività geologiche importanti come Europa, ma con altri punti di interesse come la somiglianza alla sorella Ganimede.

In passato, sono già stati svolti esperimenti di radar bistatico su altri corpi celesti del nostro sistema solare. Questi hanno permesso di misurare la costante dielettrica e la rugosità superficiale di altre superfici planetarie. Basti pensare ai dati raccolti attraverso l'esperimento di radar bistatico dalla sonda Viking 1 sulla superficie Marziana.

Un esperimento bistatico permette di caratterizzare il fenomeno fisico dello scattering con una minor complessità costruttiva rispetto ad un radar monostatico. A livello costruttivo un radar bistatico può arrivare a necessitare del solo sistema di trasmissione, mentre nel caso del radar monostatico la sonda deve installare a bordo anche un ricevitore. Questo vantaggio si presenta però al fianco di una geometria di osservazione più complessa da realizzare. Risulta cruciale determinare le finestre di tempo per compiere gli esperimenti, considerando diversi fattori geometrici e compiendo un link budget.

JUICE è dotata delle capacità tecniche necessarie a svolgere l'esperimento bi-statico. Il compito di questo lavoro sarà svolgere un'analisi delle opportunità per capire quando convenga operare l'esperimento per l'osservazione di Callisto. Per farlo, il lavoro di tesi si baserà su un lavoro di tirocinio durante il quale sono stati determinati i punti di minima distanza da Callisto lungo la traiettoria di JUICE (fly-by) e i punti speculari. Infatti, l'esperimento avrà una maggior probabilità di successo scientifico, dato dall'effettiva ricezione di riflessioni abbastanza potenti dalla superficie di Callisto, ogni qual volta JUICE si avvicini abbastanza a Callisto.

Per valutare il merito delle diverse finestre di osservazione idonee allo svolgimento di questi esperimenti, si useranno criteri come il rapporto Segnale Rumore, l'angolo di incidenza e l'osservabilità di zone di interesse scientifico/geologico. Queste infatti permetteranno di capire, una volta combinate con l'analisi del segnale, se un fly-by proposto possa essere valido dal punto di vista scientifico e se valga la pena operare l'esperimento.

Capitolo 2

JUICE: Missione ed Obiettivi

2.1 JUICE: SpaceCraft e Obiettivi missione

Il sistema Giove rappresenta un importante archetipo di sistemi mini-planetari. La missione JUICE ha come obiettivo principale caratterizzare questo tipo di sistema. Si vuole infatti cercare una connessione tra le condizioni che favoriscano lo sviluppo di vita e i giganti gassosi. È risaputo che la vita attecchisce nelle condizioni più estreme, ma non si è mai documentata la presenza di tracce di vita al di fuori del nostro pianeta. Scaturisce quindi l'interesse nel comprendere se nel sistema solare esistano condizioni che permettano lo svilupparsi della vita al di fuori della Terra. Per permettere ciò occorrono vari elementi e un ambiente favorevole: prima di tutto il carbonio, l'acqua, energia ed un ambiente stabile nel tempo. Questi requisiti potrebbero essere soddisfatti da tre lune principali su quattro: Ganimede, Callisto e Europa. Queste lune ghiacciate, mostrano habitat unici e stabili, perciò si vuole comprendere come si siano formate e come le loro interazioni all'interno del sistema permettano l'equilibrio di questi nel corso del tempo [9]. Per ricavare questi dati si utilizzerà la sonda JUICE, un satellite stabilizzato a 3 assi, con un Electric Power System (E.P.S.) alimentato da solar arrays tramite 10 pannelli solari di 2.5 m x 3.5 m ognuno. La sonda usa un sistema propulsivo principale bipropellente unito a 10 propulsori ausiliari e un design complessivo molto simile a quello usato per la missione Cassini [5].

Ciò che spicca maggiormente dello spacecraft (SC), è la strumentazione per lo studio scientifico, costituito da 10 strumenti all'avanguardia 2.1, i quali costituiscono il più potente sistema di Remote sensing che sia mai stato immesso nel sistema solare. La strumentazione è divisibile in 3 categorie diverse:

- **Strumentazione Remote Sensing:** Includono funzionalità di spettro-imaging che coprono l'intervallo dall'ultravioletto al vicino infrarosso, un avanzato sistema di imaging e uno strumento dedicato alle onde submillimetriche
- **Strumentazione geofisica:** include l'altimetria laser e il radar sounder per l'esplorazione della superficie e del sottosuolo delle lune.

- **Strumentazione in situ:** comprende un magnetometro e uno strumento per le onde radio e plasma. Inoltre è dotato di sensori per campi elettrici e magnetici, oltre a quattro sonde di Langmuir [4].
- **Strumentazione Radio Scienza:** completa i primi due pacchetti di strumenti [9].

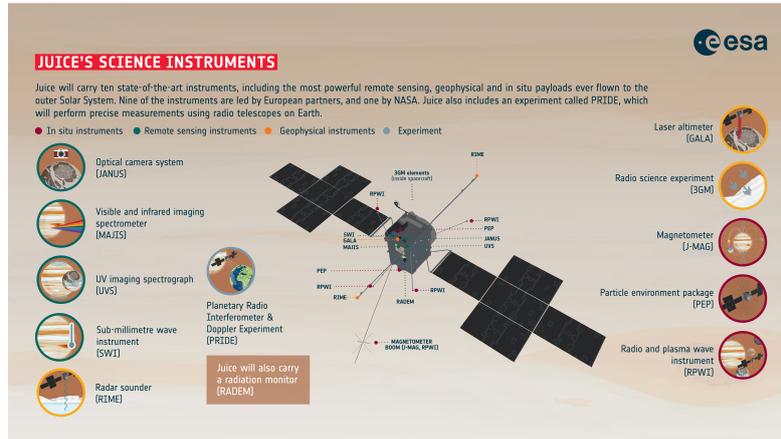


Figura 2.1: 10 strumenti costituenti il payload della sonda JUICE. L'immagine proviene da [4]

Per il lavoro proposto, il pacchetto maggiormente interessato dal nostro punto di vista è quello di Radio Scienza, che opererà tramite il sistema di comunicazione dell'esperimento 3GM, all'interno del quale si colloca anche l'esperimento di Radar Bistatico. L'esperimento 3GM ha l'obiettivo di indagare l'evoluzione e l'origine della struttura dei satelliti ghiacciati [9]. Per raggiungere questo scopo, raccoglierà dati—anche in sinergia con altri esperimenti—sul campo gravitazionale, lo stato rotazionale e altri parametri di questi satelliti.

L'esperimento 3GM comprende due elementi separati e indipendenti: un transponder in banda Ka ad alte prestazioni (KaT) e un oscillatore ultra-stabile (USO). Il transponder in banda Ka consente comunicazioni bidirezionali, mentre l'USO, grazie alla sua precisione, permette di eseguire esperimenti bistatici.

3GM potrà inoltre sfruttare due antenne: la HGA (High Gain Antenna), un'antenna fissa ad alto guadagno con un diametro di 2,5 m, e la MGA (Medium Gain Antenna), un'antenna mobile a medio guadagno. Entrambe le antenne possono operare sia in banda Ka che in banda X.

Per le sue operazioni, l'esperimento 3GM lavorerà in sinergia con l'esperimento PRIDE, che utilizza le antenne di comunicazione standard VLBI (Very Long Baseline Interferometry) di JUICE per determinare la posizione e la velocità dello spacecraft e per studiare i campi magnetici di Giove [5]. Lavorando insieme alle antenne VLBI dell'esperimento PRIDE e alle due antenne descritte in precedenza, saranno effettuate misurazioni sulle tre lune ghiacciate per studiare la costante dielettrica, il tilting e la porosità superficiali, basandosi sul fenomeno dello scattering.

Per il lavoro sottostante, si considererà la sola banda X, con una lunghezza d'onda (λ) di circa 3,6 cm [2].

2.2 Fasi Della Missione JUICE

JUICE è stata concepita per esplorare il sistema Gioviario, con un'attenzione particolare a Ganimede, la più grande luna del sistema solare. La missione ha avuto inizio con il lancio della sonda tramite un razzo Ariane il 23 aprile 2023. Successivamente, la sonda intraprenderà un lungo trasferimento interplanetario verso Giove, che potrà durare tra i 7,6 e i 9 anni. Durante questo viaggio, sfrutterà i sorvoli gravitazionali di Venere e della Terra (o di Venere, Terra e Marte) per ottimizzare la traiettoria e risparmiare carburante.

Una volta raggiunto Giove, avrà luogo una delle manovre più delicate della missione, ovvero l'inserimento in orbita attorno al pianeta, noto come Jupiter Orbit Insertion (JOI), vedi Figura 2.2. Questa manovra richiede una pianificazione precisa e rappresenta un passaggio cruciale per il successo della missione. Per ottenere l'inserimento orbitale desiderato, sarà necessaria una correzione di velocità di circa 900 m/s, tenendo conto delle perdite gravitazionali, ovvero quel processo che fa perdere velocità ad un corpo e quindi quota, a causa della forza di gravità esercitata dal corpo più massiccio sull'altro. La distanza da Giove per l'esecuzione del JOI verrà scelta per massimizzare il guadagno in $\Delta\vec{v}$, senza compromettere la sicurezza della sonda, esposta anche a forti radiazioni.

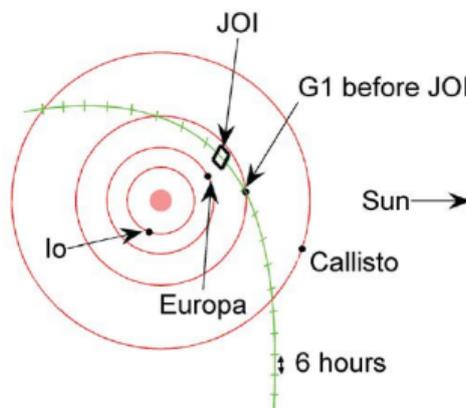


Figura 2.2: Traiettoria della missione JUICE proiettata sul piano orbitale delle lune di Giove in prossimità della JOI, la manovra più delicata della missione. Figura presa da [9]

Completato l'inserimento, avrà inizio il periodo di esplorazione scientifica dell'ambiente gioviano. Dopo il JOI, infatti, la sonda entrerà in un'orbita risonante con Ganimede (rapporto 38:1) e condurrà diversi fly-by di quest'ultima. Questo rallenterà significativamente la sonda e modificherà l'inclinazione della sua orbita, che si allineerà con il piano equatoriale di Giove.

Successivamente, inizieranno i primi fly-by di Callisto e la fase dedicata a Europa, durante la quale verranno effettuate diverse misurazioni. Conclusa la fase Europa, la missione proseguirà con la Inclined Orbit Phase, caratterizzata da una serie di fly-by di Callisto e Ganimede, che permetteranno di sorvolare le regioni polari

di Giove, sfruttando una serie di orbite risonanti con Callisto. In questo modo l'inclinazione del piano dell'orbita rispetto a Giove raggiungerà l'inclinazione di 22° . Questa fase si concluderà con il GOI (Ganymede Orbit Insertion), che segnerà l'inizio della fase finale attorno a Ganimede.

Per realizzare il GOI, sarà necessario sfruttare le assistenze gravitazionali tra Ganimede e Callisto per ridurre ulteriormente la velocità relativa rispetto a Ganimede senza utilizzo di carburante aggiuntivo. Altrimenti, sarebbe proibitivo immettersi in orbita attorno a Ganimede utilizzando il solo carburante rimasto della sonda. Questo approccio minimizza il consumo di carburante per l'inserimento in orbita attorno alla luna stessa ed in generale in tutte le fasi della missione. Una volta entrata in orbita attorno a Ganimede, JUICE effettuerà numerose orbite circolari ad altitudine compresa tra i 5000km e i 500km attorno a questa. Studierà l'ambiente circostante, raccogliendo dati dettagliati sulla composizione, geologia e campo magnetico di Ganimede

Infine, la missione si concluderà con lo studio intensivo di Ganimede, mentre la sonda sarà in orbita attorno alla luna. La fase finale durerà circa 280 giorni, con la possibilità di far impattare la sonda sulla superficie di Ganimede per soddisfare i requisiti di protezione planetaria.

2.3 Sistema Gioviario

La missione JUICE ha come obiettivo studiare Giove e le sue tre lune ghiacciate: Callisto, Ganimede e Europa. Questo perchè presentano un archetipo per strutture astrofisiche che sembrano comuni al di fuori del sistema solare. Per dare un contesto al Sistema Gioviario, questo è composto da Giove, i suoi satelliti naturali e dagli anelli planetari [9]. Parlando prima di tutto di Giove, è risaputo che questo è il quinto pianeta del sistema solare in termini di distanza dal sole e che per dimensioni si trova in prima posizione. Il pianeta presenta un nucleo presumibilmente roccioso, circondato da gas, principalmente elio e idrogeno. Per questo motivo è classificato come gigante gassoso, poiché privo di una superficie solida. Inoltre, Giove è caratterizzato da forti fenomeni atmosferici, questo si nota dalle sue immagini le quali mostrano fenomeni vorticosi e turbolenti sulla superficie, causati probabilmente da moti convettivi tra equatore e poli [8]. Capire questi fenomeni permetterà di avere una maggior comprensione dei giganti gassosi e il loro funzionamento. Il campo magnetico sviluppato da Giove è un altro importante oggetto di studio, di fatto la magnetosfera di Giove è la più grande e potente del sistema solare. Data la velocità elevata con cui ruota il campo magnetico di Giove stesso, raccoglie plasma schiacciandolo in un disco, questo plasma impatta contro le lune circostanti creando i Tori e formando una tenue atmosfera attorno ad esse [9]. Questi fenomeni sono tutti oggetto di studio ed allo stesso tempo potenziali rischi per la missione. Come descritto sopra nel testo, Giove possiede un grandissimo numero di satelliti naturali, stimati circa attorno ai 92 al momento della stesura del lavoro di tesi. Di questi, l'interesse della missione si aggira attorno a 3 dei 4 satelliti naturali principali di Giove, ovvero Callisto, Ganimede, Europa e Io. L'interesse fisico riguardo alle 3 lune in studio dipende dalla loro conformazione, ognuna di esse verrà studiata per motivi differenti, ma la causa di fondo è la presenza di ghiaccio e acqua. Il lavoro sottostante si concentrerà su Callisto.

2.4 Morfologia di Callisto e Caratteristiche Principali

Ai fini dello studio delle opportunità, viene proposta una breve analisi delle caratteristiche di Callisto per fornire un contesto alla trattazione. Il satellite Gioviario è la seconda in termini di dimensioni delle 3 lune ghiacciate che verranno studiate all'interno della missione. Questa può essere approssimata come sferica con un raggio medio di 2.410,3 km a differenza delle sorelle che presentano una forma più ellittica. Dalle immagini riportate dalla sonda Galileo, la superficie può essere divisa in due tipi di zone: i terreni luminosi e terreni scuri. I terreni luminosi sono principalmente composti da ghiaccio, mentre quelli scuri sono relativi ad impatti di corpi estranei che portano ad una redistribuzione del materiale superficiale. La maggior parte di Callisto, infatti, è composta da ghiaccio, mescolato ad alcune impurità probabilmente causate da depositi di materiale roccioso provenienti dallo spazio o da impatti di asteroidi [6].

Gli impatti di asteroidi caratterizzano la superficie lunare di Callisto più di ogni altra luna del sistema Gioviario. A differenza delle altre lune, non sembrano essere

presenti fenomeni tettonici superficiali che riconducano ad un'attività geologica rilevante. La causa potrebbe essere che Callisto è esclusa dalla risonanza orbitale che coinvolge Io, Europa e Ganimede. Tra le strutture più interessanti che presenta la luna, le più peculiari sono i 'knobs', ovvero resti di crateri, catene montuose o simili, i quali sono stati erosi per sublimazione. In questo contesto, l'unico fattore che influisce significativamente sulla permittività relativa è la presenza di impurità rocciosa nel ghiaccio [6].

A livello atmosferico, Callisto presenta una sottile atmosfera composta principalmente da CO_2 e in piccola parte da O_2 , la densità atmosferica si aggira attorno a $4e8 \text{ cm}^{-3}$ [3]. Data la bassa densità atmosferica, Callisto non è in grado di trattenere il calore in maniera così marcata attraverso l'effetto serra. Si percepisce una grande variazione di temperatura tra il giorno e la notte, dato che questa viene influenzata in maniera significativa dalla radiazione solare e in maniera molto minore dall'atmosfera. Di giorno si hanno in genere attorno ai 150 K, mentre la notte 90-95 K. [12] Seguendo la catalogazione proposta in [12], le aree di interesse che possono risultare rilevanti da osservare durante la fase scientifica sono:

- Polar Deposits
- bright terrain, grooves and fractures
- bright ray craters
- ancient dark terrains
- Impact crater morphologies and catenae
- Dark ray, floor and halo craters

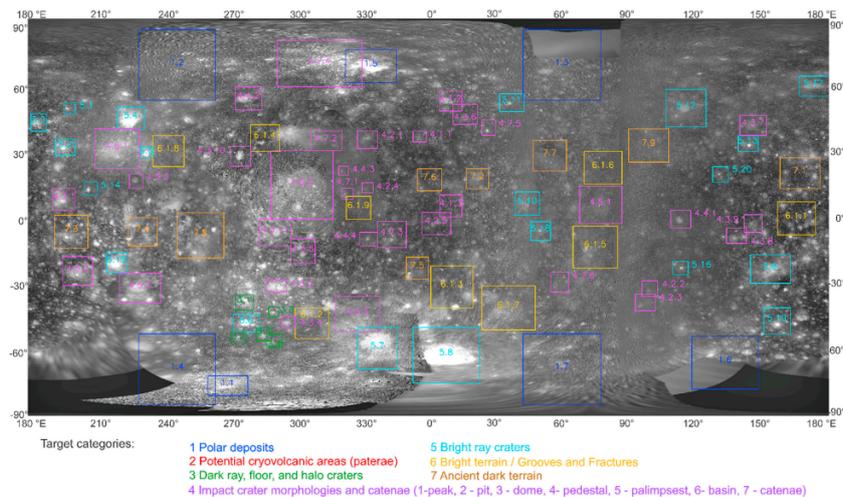


Figura 2.3: Mappatura delle zone di interesse scientifico per Callisto ricavata dalle immagini della sonda Galileo [12]. La mappa di Callisto utilizzata qui e nelle successive immagini della tesi è presa da [11]

Come sarà evidenziato nel lavoro, non tutte le zone in 2.3 presenti saranno illuminabili nei soli 21 fly-by che la sonda JUICE compirà rispetto a Callisto (vedi sezione 2.5), ma risulta corretto introdurle ai fini di analisi future.

2.5 Fly-by di Callisto

Al fine di analizzare le opportunità nelle quali condurre l'esperimento bistatico, è stato necessario in primo luogo determinare i fly-by di Callisto da parte di JUICE. Un fly-by consiste nel passaggio ravvicinato ad un corpo celeste, da parte della sonda. Ciò permette di sfruttare la gravità esercitata dal corpo sul satellite per modificarne l'energia e di conseguenza la velocità. Perciò, si è dovuto determinare i fly-by per capire quando il satellite si trovasse vicino a Callisto. Quando si opera un esperimento bistatico si è dipendenti dalle distanze, si vuole quindi condurlo nel momento in cui ci si trova più vicini al corpo che si vuole sondare. Il metodo utilizzato per determinare i fly-by sfrutta i dati forniti dal Redbook di JUICE [9]. Grazie a questi è stato possibile individuare il range temporale in cui si sarebbe svolta la fase scientifica dello studio del sistema Giove. L'inizio di questo range coincide con la data in cui la sonda affronta la manovra in Figura 2.2. Una volta trovato il range temporale della fase scientifica è stato usato il concetto di sfera di Hill per trovare quando il satellite stesse attraversando una fase di fly-by. La sfera di Hill o di influenza è la sfera entro la quale dati due corpi, un corpo A di massa M e un corpo B di massa m , si può considerare il corpo di massa m sotto l'effetto attrattivo del corpo di massa M senza considerare gli effetti gravitazionali di altri corpi esterni [7]. Per calcolare il raggio della sfera di influenza si utilizza la formula approssimata:

$$r = a \cdot \sqrt[3]{\frac{m}{3M}} \quad (2.1)$$

dove m è il corpo di massa minore, M quello di massa maggiore, mentre a è il semiasse maggiore. Ad esempio, il raggio della sfera di Hill di Callisto è di circa 50146.35 km, mentre quello di Ganimede è circa 31722.44 km. Confrontando numericamente la distanza tra JUICE e il centro di Callisto con il raggio della sfera di influenza della luna stessa tramite la formula 2.1, si è determinato se i punti si trovassero all'interno di questa o meno. Trovati i punti nel quale il satellite fosse in fly-by, è stata riportata per comodità un'unica data, ovvero quella corrispondente al Closest-Approach o CA, questo non è altro che la minima distanza tra JUICE e il pianeta durante l'arco del fly-by. In tabella 2.1 sono riportati i fly-by presi dal lavoro di tirocinio. Questi dati sono stati ricavati con passo temporale di 30 minuti circa, nell'intervallo di 1259 giorni di fase scientifica.

Risulta importante ribadire che i risultati mostrati sono stati la base del lavoro per determinare le finestre di opportunità. Dopo questo sono stati calcolati i punti speculari, dei quali si parlerà in seguito, dai quali siamo partiti per porre le considerazioni sulle opportunità di carattere scientifico.

n_fly-by	Data	altitudine(km)	velocità (km/s)
C0	2032-06-21T00:47:25	4212.69	5.31
C1	2032-07-29T01:49:01	4441.68	5.41
C2	2032-08-14T18:10:45	1301.79	5.57
C3	2032-09-10T19:19:10	816.02	5.63
C4	2032-09-27T12:11:06	2152.67	5.51
C5	2032-10-14T04:32:49	555.53	5.66
C6	2032-10-30T20:54:33	236.22	5.71
C7	2032-11-16T13:16:16	200.02	5.72
C8	2032-12-03T05:37:59	1244.46	5.58
C9	2033-02-24T15:56:48	3362.38	5.44
C10	2033-03-13T08:18:31	3038.25	5.46
C11	2033-05-10T16:19:00	1838.86	5.54
C12	2033-06-04T18:37:20	210.57	5.71
C13	2033-06-21T10:59:03	312.40	5.69
C14	2033-07-08T03:20:47	355.40	5.68
C15	2033-07-24T19:42:30	428.43	5.67
C16	2033-08-10T12:04:13	1679.52	5.54
C17	2033-11-01T22:53:15	1060.03	5.59
C18	2034-02-14T23:54:33	1331.03	3.02
C19	2034-05-01T22:26:15	3076.63	2.81
C20	2034-06-24T05:04:40	6655.23	1.71

Tabella 2.1: Tabella fly-by di JUICE attorno a Callisto. I dati sono stati ricavati con passo temporale di 30 minuti circa, nell'intervallo di 1259 giorni di fase scientifica.

Capitolo 3

Esperimento di Radar Bistatico

3.1 Funzionamento di un Esperimento Radar Bistatico

Ai fini dello studio è importante capire il funzionamento di un esperimento di radar bistatico di downlink. Tramite una trasmittente (l'antenna di JUICE), viene inviato un segnale verso il corpo che si desidera sondare (Callisto). Questo segnale verrà riflesso dalla superficie target in direzione quasi-speculare. Con un adeguato puntamento dell'antenna di JUICE, è possibile fare sì che la riflessione quasi-speculare dalla superficie di Callisto sia ricevuta dalle antenna a grande raggio del sistema European Space Tracking (ESTRACK) sulla Terra. Sulla superficie del corpo sondato si avrà uno punto speculare, cioè quel punto ideale dal quale parte il vettore riflessione del segnale incidente [2]. Nella realtà non ci sarà un singolo punto ma un area illuminata, della quale lo punto speculare è il centro nominale. Per capire cosa sia una riflessione quasi-speculare bisogna capire cosa avviene durante la riflessione.

Una volta che l'onda elettromagnetica raggiunge la superficie del corpo, dato che essa non è perfettamente liscia ma presenta una certa rugosità, subisce il fenomeno dello scattering, il quale non si limita a riflettere il segnale in una direzione specifica, ma lo diffonde omnidirezionalmente, generando una distribuzione di raggi con varie angolazioni. Questo fenomeno risulta alquanto complesso da modellizzare nella sua interezza, ed è ancora in fase di studio [10]. Per analizzarlo in maniera semplificata, in questo lavoro viene usato il modello di Kirchhoff, il quale assume le seguenti ipotesi: i) la superficie del corpo deve avere un comportamento isotropico e omogeneo, ii) la lunghezza della correlazione deve essere maggiore di λ , iii) lo scattering sotto la superficie deve essere trascurabile. Questo tipo di esperimenti non si applica dove le superfici hanno lunghezza di correlazione comparabili o inferiori alla lunghezza d'onda dello strumento, o dove il volume dello scattering domina lo spettro.

Verificata la seconda ipotesi del modello di Kirchhoff, si può modellare la superficie come un reticolo di faccette con orientamento variabile. Ciascuna faccetta può essere vista come un piano perfettamente liscio che riflette il segnale in modo speculare. Il segnale globale ricevuto è dato dalla somma dei segnali riflessi dalle diverse

facette. Tuttavia, non tutte le facette saranno orientate in modo da riflettere il segnale nella direzione congrua a quella data da una riflessione speculare su una superficie senza rugosità. Questo meccanismo è descritto come "quasi-speculare", proprio, perché non si ha un'unica riflessione speculare in un punto, ma si ha una somma di riflessioni speculari date dalle singole facette. Questo tipo di fenomeno genera una dispersione in frequenza del segnale, la quale aumenta con l'aumentare della rugosità della superficie. Il parametro che definisce quanto le singole facette all'interno dell'area illuminata dal satellite non siano orientate in una singola direzione si chiama 'surface slope'. Non verrà trattato all'interno del lavoro proposto ma è giusto dire che questa quantità è una metrica della rugosità di una superficie generica [10].

L'ampiezza della componente quasi-speculare dello scattering è influenzata dal dielettrico della superficie riflettente. Questo valore determina l'ampiezza dell'eco riflesso attraverso i coefficienti di riflessione di Fresnel, che dipendono dall'angolo di incidenza del raggio, dalla polarizzazione del raggio incidente e dalla costante dielettrica. A differenza dei radar monostatici, che misurano il backscattering (cioè l'onda riflessa nella direzione da cui è stato trasmesso il segnale), nei radar bistatici, trasmettente e ricevente sono posizionati in punti diversi. Tenendo a mente il meccanismo di scattering trattato, il lavoro svolto si concentra sulla sola componente quasi-speculare. Definiamo il raggio incidente \vec{t}' come il vettore trasmettente-punto speculare e il vettore ricevente, \vec{r}' , come il vettore punto speculare-ricevente 3.1. Da Figura 3.1, si mostra uno dei diretti vantaggi di questo tipo di geometria, infatti viene eliminato il bisogno di immagazzinare dati per poi trasmetterli a terra in un secondo momento. Questo si traduce in una minor complessità costruttiva. Inoltre, garantisce una migliore caratterizzazione delle proprietà dello scattering del corpo da sondare, risultando molto utile nello studio della rugosità superficiale, della densità o della geologia del corpo celeste in esame.

Risulta di vitale importanza per lo studio delle finestre di opportunità individuare le posizioni rispettive di trasmettente (JUICE), oggetto da sondare (Callisto) e ricevente (Terra) che garantiscano la ricezione della componente quasi-speculare della riflessione a Terra e che massimizzino la potenza ricevuta, al limite delle possibilità tecnologiche degli strumenti .

Per fare ciò è fondamentale determinare le finestre di tempo nelle quali spacecraft e oggetto sono a minor distanza l'uno dall'altro, senza corpi ad ostruire il passaggio del segnale. Infatti quando si ha occultazione geometrica, la trasmettente viene occultata dal corpo da sondare rispetto al ricevitore. Per questo motivo, è fondamentale pianificare attentamente quando eseguire l'esperimento, studiando quali siano le più adeguate finestre di opportunità.

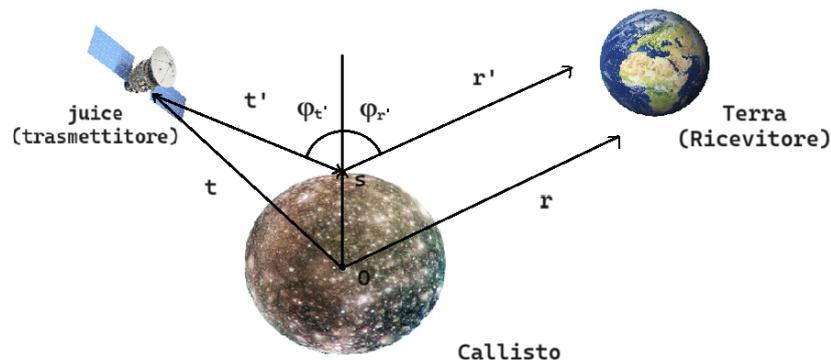


Figura 3.1: Immagine esplicativa della geometria di un esperimento bistatico. E' possibile notare in Figura il \vec{t}' vettore trasmittente-punto speculare e \vec{r}' vettore punto speculare-ricevente. Mentre i vettori \vec{t} e \vec{r} sono quelli che hanno origine nel sistema inerziale di Callisto e vertice nelle rispettive trasmettenti e riceventi. Si trova poi φ_V cioè l'angolo di riflessione speculare. Nel lavoro per semplicità verrà chiamato φ

3.2 Potenza Ricevuta

Per analizzare le caratteristiche della superficie di un target, si ricorre a un modello di ottica geometrica, che fornisca informazioni sull'RMS (Root Mean Square) della superficie, la distribuzione di probabilità della rugosità (la quale è correlata all'errore di misurazione) e la costante dielettrica del materiale. Questo approccio consente una valutazione accurata delle proprietà superficiali [10].

Si apre ora una parentesi sull'effetto Doppler, che si verifica quando il target, il satellite e il ricevitore sono in movimento relativo tra loro. Diventa evidente che quando un'onda viene inviata verso un corpo in movimento, essa percorre una certa distanza nello spazio da un punto A ad un punto B. Di conseguenza, il corpo in movimento può alterare la lunghezza del tragitto dell'onda, accorciandolo o allungandolo a seconda della sua direzione di movimento. Se si visualizza la componente quasi-speculare della riflessione come discretizzata in riflessioni speculari da faccette perfettamente lisce, ogni singolo raggio diffuso che deve arrivare alla ricevente subisce un preciso effetto Doppler, diverso per ogni punto riflettente sul pianeta bersaglio illuminato dal footprint dell'antenna. Questo fenomeno causa una dispersione in frequenza dell'eco riflesso[10].

$$f_r = -\frac{1}{\lambda} \frac{d}{dt} (|\vec{r}'| + |\vec{t}'|) \quad (3.1)$$

In formula troviamo: f_r frequenza derivante dall'effetto Doppler, λ lunghezza d'onda dello strumento utilizzato, mentre $|\vec{t}'|$ e $|\vec{r}'|$ sono i moduli dei vettori trasmittente-punto speculare e punto speculare-ricevente. La potenza P_R , ossia la potenza che arriva al trasmettitore, sarà la somma di tutte le potenze relative riflesse in corrispondenza di ogni singola faccetta.

$$P_R = \frac{P_T \cdot G_T}{4\pi|\vec{t}|^2} \cdot \sigma \cdot \frac{G_R \cdot \lambda^2}{(4\pi|\vec{r}|)^2} \quad (3.2)$$

La potenza P_R risulta quindi influenzata da diversi fattori. Tra questi troviamo delle quantità dipendenti dalle specifiche tecniche della strumentazione di JUICE: P_T , G_T , G_R e λ . P_T è la potenza dell'antenna trasmittente, G_T è il suo guadagno, e G_R è il guadagno della ricevente. Riportiamo 3.1 i dati tecnici utilizzati per il calcolo sia della Potenza.

Transmit Power, $P_t[W]$	Transmit Gain, $G_t[dBi]$	Receiver Gain, $G_r[dBi]$	Wave length, $\lambda[cm]$
52	43.85	68.2	3.6

Tabella 3.1: tabella dati tecnici JUICE [2]

Tra i parametri non dipendenti da JUICE ma dipendenti unicamente dalla geometria del problema troviamo: $|\vec{r}|$ modulo del vettore centro Callisto-ricevitore, $|\vec{t}|$ modulo del vettore centro Callisto-trasmittitore (riportati in Figura 3.1). È importante notare che, al denominatore dell'equazione, compaiono le distanze del ricevitore e del trasmettitore dal centro di Callisto. La dipendenza quadratica da ciascuna di queste due distanze rappresenta il motivo principale per cui è conveniente concentrarsi sui fly-by per l'analisi delle opportunità, trascurando il resto della traiettoria della sonda. Infine compare σ , la **radar cross-section** del pianeta. Quest'ultima rappresenta l'area sul pianeta target, illuminata dal raggio incidente, la quale escludendo il trasmettitore irradierebbe isotropicamente la stessa quantità di segnale ricevuto. Il parametro è formato da due diversi contributi, il primo è unicamente funzione della geometria del problema, mentre il secondo è la riflettività. Quest'ultima dipende dalla costante dielettrica della superficie del target che si vuole sondare e dall'angolo di incidenza [2].

Per il tipo di studio presentato, basta ottenere una stima in prima approssimazione. Quindi, si considera per la componente geometrica il modello della sfera a conducibilità perfetta. Questa ipotesi permette di considerare il parametro come funzione solo della geometria del corpo (considerato sferico di raggio medio R) e della geometria dell'esperimento bistatico, utilizzando l'angolo e il punto di riflessione speculare, insieme ai coefficienti di riflessione di Fresnel che dipendono anche dalla polarizzazione, permittività dielettrica e angolo speculare [10].

$$\sigma = \frac{4\pi|\vec{t}|^2 R_p^2 \cos \varphi}{(R_p \cdot \cos \varphi + 2 \cdot |\vec{t}|) \cdot (R_p + 2 \cdot |\vec{t}| \cos \varphi)} \cdot \rho \quad (3.3)$$

ove ρ è la riflettività, R_p il Raggio del pianeta e ϕ l'angolo speculare.

3.3 Punto Speculare

Avendo quindi compreso la fisica del problema tramite le approssimazioni adottate, si può ora tornare a esaminare il punto speculare. Nei paragrafi precedenti si è visto che questi punti sono quelli che giacciono sulla superficie di Callisto tali per cui la riflessione è speculare. Per la determinazione quindi dei punti speculari, vedi Figura 3.1, si è risolto numericamente un sistema geometrico non lineare seguendo il metodo spiegato in [2]. Il punto speculare deve soddisfare i seguenti vincoli:

- il punto speculare giace sempre sulla superficie di Callisto
- i vettori r' e t' giacciono sempre sullo stesso piano
- ho una riflessione speculare nel piano ($\varphi_{r'} = \varphi_{t'}$)

Queste ipotesi possono essere tradotte in un sistema di 3 equazioni composto da :

$$x^2 + y^2 + z^2 = R_p^2 \quad (3.4)$$

$$\det \begin{pmatrix} \hat{t}'_x & \hat{n}(x) & \hat{r}'_x \\ \hat{t}'_y & \hat{n}(y) & \hat{r}'_y \\ \hat{t}'_z & \hat{n}(z) & \hat{r}'_z \end{pmatrix} = 0 \quad (3.5)$$

$$\hat{n}(X) \cdot \hat{t}' = \hat{n}(X) \cdot \hat{r}' \quad (3.6)$$

Dove $X = [x, y, z]$ è la posizione incognita del punto speculare nel riferimento IAU_CALLISTO. Inoltre, nel sistema di equazioni rappresentato, compare anche $\vec{n}(X)$, che non è altro che la normale 'locale' situata in corrispondenza del punto speculare, definibile in questo modo:

$$\vec{n}(X) = \nabla f(x, y, z) \quad (3.7)$$

Ove $f(x, y, z)$ è una 2-varietà: una sfera (Callisto nel nostro caso) Partendo dall'equazione 3.4, si considera la superficie di Callisto come una sfera di raggio R_p , giustificato da studi sulla geometria della luna stessa [1]. Questo implica che il punto considerato si troverà sulla superficie della sfera, in linea con la prima ipotesi.

L'equazione 3.5 si riferisce alla seconda ipotesi, secondo la quale i vettori \vec{r}' e \vec{t}' giacciono sullo stesso piano. Di conseguenza, il prodotto misto della terna non ortonormale $\vec{r}', \vec{t}', \vec{n}$ sarà nullo. In altre parole, considerando la terna non ortogonale composta dai versori $\hat{t}', \hat{r}', \hat{n}(X)$, il determinante sarà nullo.

Si analizza infine l'equazione 3.6, che deriva direttamente dalla terza ipotesi sopra citata. Questa ipotesi afferma che l'angolo di riflessione è uguale all'angolo tra la normale e il vettore trasmittente. Utilizzando i coseni direttori, si può ricavare la terza equazione. Naturalmente il punto speculare esiste solamente quando la sonda JUICE non si trova in occultazione geometrica dietro a Callisto, rispetto alla Terra. Come si vedrà nei paragrafi successivi, questa condizione sarà importante da determinare per la valutazione delle finestre di opportunità.

3.4 Coefficienti di Fresnel

Parlando di Riflettività, come citato sopra, si deve tener conto dei coefficienti di Fresnel. Questi sono coefficienti complessi che descrivono il comportamento di un'onda elettromagnetica che interagisca con l'interfaccia tra due mezzi aventi diversa costante dielettrica. Assumendo che il mezzo di arrivo del segnale abbia costante dielettrica unitaria (vuoto), le equazioni [10] che li descrivono sono:

$$R_{HH} = \frac{\cos \varphi - \sqrt{\varepsilon - \sin^2 \varphi}}{\cos(\varphi) + \sqrt{\varepsilon - \sin^2 \varphi}} \quad (3.8)$$

$$R_{VV} = \frac{\varepsilon \cdot \cos \varphi - \sqrt{\varepsilon - \sin^2 \varphi}}{\varepsilon \cdot \cos(\varphi) + \sqrt{\varepsilon - \sin^2 \varphi}} \quad (3.9)$$

$$R_{SC} = \frac{(R_{VV} + R_{HH})}{2} \quad (3.10)$$

$$R_{OC} = \frac{(R_{VV} - R_{HH})}{2} \quad (3.11)$$

Dove ε è permittività relativa dell'interfaccia riflettente. R_{HH} ed R_{VV} si usano in riferimento a polarizzazioni lineari, rispettivamente orizzontali o verticali rispetto al piano di riflessione. Dato che JUICE trasmetterà sempre in RCP, quindi un'onda polarizzata circolarmente, l'interesse è capire come le componenti espresse siano legate a questa polarizzazione.

Nel caso di un'onda a polarizzazione circolare generica, ci si aspetta di trovare tutte e due le componenti, cioè sia R_{sc} e R_{oc} . Questo è giustificato dal fatto che quando si ha un'onda a polarizzazione circolare, il campo elettrico ruota nello spazio mentre l'onda si muove una direzione. Avrà quindi due componenti una verticale e una orizzontale ottenute dalla proiezione del campo elettrico sui due piani, le quali hanno andamento sinusoidale ad ampiezze uguali sui rispettivi piani. In base allo sfasamento il senso di rotazione può essere RCP o LCP. Risolvendo le equazioni da 3.8 a 3.11, si possono determinare la componente che ruota nello stesso senso, e quella che ruota in senso opposto. Questo porterà ad avere radar cross-section diverse in base al tipo di polarizzazione ricevuta. Ciò che è interessante ai fini della localizzazione di possibili finestre di tempo in cui compiere l'esperimento, è determinare R_{SC} e R_{OC} . Come mostrato nell'equazione sottostante [11], il quadrato di questi due coefficienti è la Riflettività ρ nelle due diverse polarizzazioni:

$$\frac{\rho_{SC}}{\rho_{OC}} = \frac{|R_{SC}|^2}{|R_{OC}|^2} \quad (3.12)$$

È noto che un rapporto tra riflettività pari a 1 si ha nell'intorno dell'angolo di Brewster (φ_B),

$$\varphi_B = \arctan(\sqrt{\varepsilon}) \quad (3.13)$$

l'angolo per il quale vale $|R_{SC}|^2 = |R_{OC}|^2$ [11].

Partendo da queste considerazioni e assumendo un approccio in prima approssimazione, lo studio esclude l'effetto dello scattering sottosuperficiale (o volumetrico),

concentrandosi esclusivamente sulla superficie. Usando i dati riportati nello studio [6], i quali indicano un valore nominale della permittività dielettrica superficiale pari a 3.84, si è scelto questo valore per lo studio delle finestre di opportunità

3.5 Rapporto Segnale-Rumore

Il Signal to Noise density Ratio anche detto SNDR, è un valore importante dal punto di vista delle telecomunicazioni che da una stima di quanto sia alto il disturbo sul segnale che si riceve. L'unità di misura in cui viene solitamente presentato è il dBHz. Questo valore è più utile della sola potenza ricevuta P_R , in quanto si può dare una stima di quanto sia grande questa rispetto al rumore. Questo parametro è definito come [11]:

$$S.N.D.R. = \frac{P_{signal}}{P_{noise}} = \frac{P_r}{k \cdot T_{sys}} \quad (3.14)$$

Dove si trova k , la costante di Boltzman $1.380649 \cdot 10^{-23} Jk^{-1}$, T_{sys} che è la temperatura del rumore di sistema, e tiene conto del rumore prodotto dal sistema in sé, ed infine P_R , la potenza ricevuta. Osservando l'equazione risulta evidente l'importanza del parametro in quanto, un SNDR elevato vorrà dire che il rumore sarà basso rispetto alla potenza del segnale, mentre viceversa risulterà un SNDR basso. Quindi valori bassi di SNDR risulterebbero in una maggiore difficoltà nell'estrarre informazioni scientifiche accurate dagli echi riflessi ricevuti a Terra.

Capitolo 4

Risultati Preliminari

4.1 Criteri di selezione e ipotesi

All'interno dello studio proposto, sono stati analizzati i 21 fly-by dello spacecraft JUICE in prossimità di Callisto, riportati nella sezione 2.5. A partire da questi, si sono imposti una serie di criteri di merito da verificare per capire se i fly-by presi in considerazione fossero interessanti per lo studio o meno.

Come primo criterio di selezione, si è ipotizzato che la migliore situazione desiderata sia quando il segnale riflesso abbia le due componenti di polarizzazione RCP e LCP simili, dunque che l'angolo di osservazione si trovi in un intorno dell'angolo di Brewster. Se infatti l'angolo di riflessione fosse lontano da questo, una delle due componenti diverrebbe molto più debole portando a non rendere affidabile il calcolo delle potenze.

Per questo motivo, si è calcolato l'angolo di Brewster, il quale si aggira attorno ai 63° , per la costante dielettrica assunta per la superficie di Callisto, 3.84. A partire da questo scenario ideale in cui $|R_{SC}|^2 = |R_{OC}|^2$, è stato stabilito un range all'interno del quale si deve trovare il rapporto tra le riflettività per le due diverse polarizzazioni (3.12). Considerando che in letteratura scientifica solitamente questo rapporto viene assunto tra 0.5 e 2, per dare maggiore solidità allo studio è stato fatto il medesimo lavoro, ma con una forbice più stretta. Il range che si è scelto è stato tra 0.5 e 1.5, in favore di una maggiore potenza della riflessione con polarizzazione più debole. Ovviamente 0.5 e 1.5 sono valori limite, infatti la condizione migliore la si otterrebbe con un rapporto di 1. È tuttavia accettabile scendere al compromesso di avere una finestra di lavoro più ampia in cambio di una maggiore incertezza nel calcolo della potenza.

Dall'analisi si è voluto distinguere tre categorie di punti, divisibili in base all'angolo di incidenza:

1. accettabile, ovvero punti nel range tra 0.5 e 1.5
2. ideale, punti in cui si ha il valore più vicino all'angolo di Brewster (con un errore di $1e-3$)

3. non interessante, ovvero punti che non rientrano nelle altre categorie.

Come secondo criterio si è deciso di adottare un limite sullo slant-range, ovvero la distanza tra SC e punto speculare. Esso corrisponde anche alla norma del vettore posizione \vec{t}' (vedi Figura 3.1). Rifacendosi a quanto fatto in passato dalla sonda Cassini, selezioniamo 30000 km come una distanza, tra sonda e punto speculare, dopo la quale non convenga più operare l'esperimento per via del basso rapporto segnale rumore. Si è deciso, perciò di prediligere quei fly-by che avevano un alto numero di punti con slant-range compatibile con le ipotesi fatte.

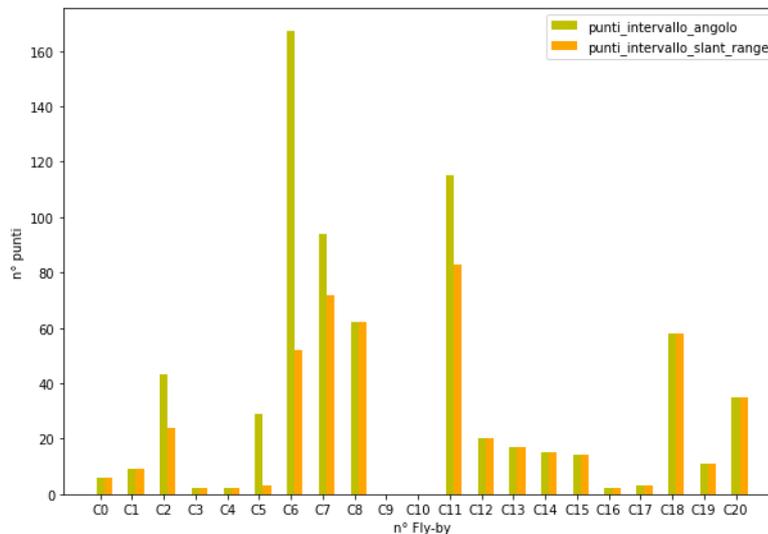


Figura 4.1: Istogramma che riporta in giallo la quantità di punti speculari, calcolati con passo di 1 minuto su 6 ore di arco temporale, provenienti dal primo criterio. In arancione la quantità di punti speculari derivanti dall'unione del primo e secondo criterio citati nel testo, calcolati con le stesse condizioni.

La Figura 4.1 mostra due quantità per ogni fly-by. Entrambe le quantità riportate per ogni fly-by sono riferite al numero di punto speculare, questi sono calcolati con passo di 1 minuto su 6 ore di arco temporale. In Giallo sono riportate le quantità di punti che rispettano il primo criterio. In arancione sono riportate le quantità di punti che rispettano il primo ed il secondo criterio contemporaneamente. Dalla Figura 4.1, si possono scartare tutti quei fly-by che presentano un numero non significativo di punti al netto delle ipotesi.

La terza ipotesi, per decidere quali fly-by valga la pena prendere in considerazione è stata che i punti speculari che già soddisfacevano i primi due criteri ricadessero all'interno di zone di interesse geologico/scientifico. Per controllare ciò viene utilizzata la traccia a terra dei punti speculari stessi assieme ad una mappa dettagliata di Callisto, ricavata da letteratura scientifica [12].

Al seguito di queste ipotesi l'analisi preliminare compiuta ha portato ad individuare 3 fly-by su tutti che potessero risultare validi: C6, C7 e C11. Partendo da questi, è stata compiuta un'analisi più dettagliata e focalizzata su angolo di

incidenza, rapporto segnale/rumore (SNDR) e potenze misurate in entrambe le polarizzazioni.

4.2 Fly-by C11

Lo studio delle opportunità svolto, come descritto brevemente nel paragrafo precedente, è strutturato su tre parametri:

- angolo di incidenza
- potenza ricevuta
- SNDR, signal-to-noise density ratio

Dunque, utilizzando gli angoli di incidenza trovati dalla modellazione della traiettoria di JUICE durante il fly-by e dall'individuazione del punto speculare, sono stati calcolati i coefficienti di Fresnel per una dielettrica di 3.84 nell'intorno del punto di minima distanza di JUICE da Callisto. Il calcolo è stato svolto per polarizzazioni circolari risolvendo le equazioni dalla 3.8 alla 3.11. I valori, che rientrano nella forbice di rapporti tra riflettività descritta nel paragrafo precedente, sono mostrati in scala logaritmica rappresentati in funzione degli angoli, in Figura 4.2.

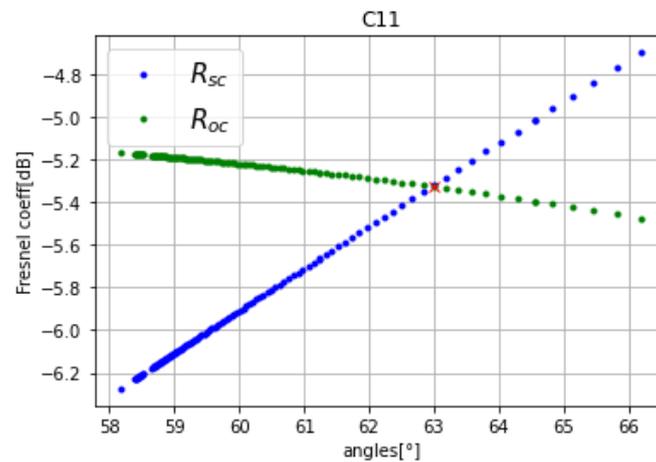


Figura 4.2: Coefficienti di Fresnel all'interno della forbice in rapporto agli angoli di incidenza

Osservando il grafico è visibile un aumento della componente R_{SC} con l'aumento dell'angolo e viceversa una riduzione di R_{OC} . Questo è coerente con la natura dei coefficienti di Fresnel stessi, infatti quando si parla di polarizzazione circolare ci aspettiamo sempre due componenti con polarizzazione circolare ortogonale dopo la riflessione. Intorno a Brewster ($\approx 63^\circ$) si trova che le due si uguagliano. Questo avviene perchè l'angolo stesso è quel valore per il quale la parte di onda elettromagnetica riflessa R_{VV} è completamente assorbita dal mezzo, quindi è uguale a zero, e l'onda ha polarizzazione orizzontale con ampiezza determinata da R_{HH} . Avvicinandosi a Brewster, si può notare dalle equazioni sopra riportate nel paragrafo 3.4 che il rapporto tra le due componenti RCP e LCP diventi 1. Questa caratteristica si rispecchia anche nelle potenze ricevute P_R .

Integrando la traccia a terra dei punti speculari con i dati riportati in Figura 4.2, si riporta la posizione dei punti rispetto alle zone di interesse osservabili in

Figura 4.3. I punti che soddisfano l'ipotesi sul range di rapporti tra riflettività sono evidenziati con colori diversi: in verde, i punti speculari con coefficienti corrispondenti ad un rapporto tra riflettività minore di 1.5 e maggiore di 0.5 (mostrati anche in Figura 4.2), e in rosso il punto relativo all'angolo di Brewster.

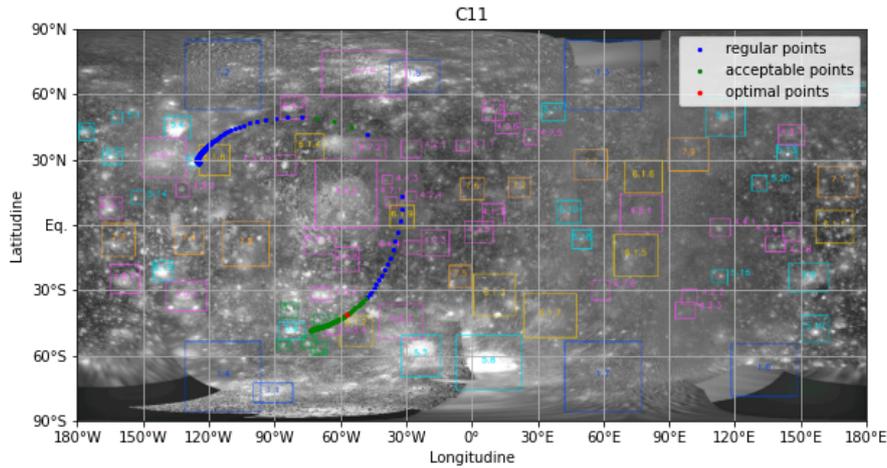


Figura 4.3: Traccia a terra dei punti speculari durante il fly-by C11. Questi sono evidenziati con colori diversi in base al diverso grado di soddisfacimento del criterio di merito basato sull'angolo di incidenza secondo le categorie introdotte all'inizio della sezione 4.2: Accettabile (verde), non accettabile (blu) e ottimo (rosso). La mappa di Callisto è presa dallo studio [12] riporta con riquadri di colori diversi le zone di interesse sulla superficie (si veda anche Figura 2.3)

Il fly-by C11 è stato selezionato dato che nei punti in cui l'angolo di incidenza si trova all'interno di un range di valori accettabili vengono attraversate zone di interesse come halo craters, impact craters morphologies and catenae, bright terrains/grooves and fractures, nonché ancient dark terrains e bright ray craters (Figura 4.4). Zone interessanti per operare l'esperimento bistatico e raccogliere dati di interesse scientifico geologico. Tra i fly-by descritti nel paragrafo metodologico, il C11 è il più promettente in rapporto alle tre ipotesi. In questo, si trovano un numero di punti accettabili all'interno del range, per un totale di 111 e una densità molto elevata di punti che coprono zone di interesse. Infatti tra (40°S, 60°S) e (50°W, 80°W), i riquadri relativi a zone di interesse mostrati in Figura 4.4, contengono un numero di punti, corrispondente all'89% dei punti che soddisfano la condizione sul rapporto tra le riflettività.

In Figura 4.4, la traccia a terra dei punti quasi speculari attraversa diverse zone di interesse. Le zone che vengono attraversate all'interno della Figura 4.4 sono rispettivamente le 6.1.2 e la 4.3.4. Nel primo caso si tratta di zone di bright terrain, come crepacci o solchi, la cui formazione su Callisto è ancora da studiare per comprenderne i meccanismi. Analizzare queste strutture, date le caratteristiche lineari della superficie, permetterebbe di determinare se si originano a seguito di impatti o per altre cause. Nel secondo caso invece si parla puramente di crateri dati da impatti, che possono avere differente morfologia. Dal tipo di forma del cratere

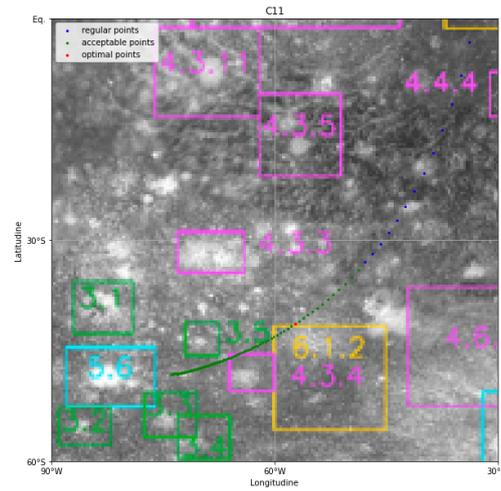


Figura 4.4: Particolare della mappa di Callisto relativo alla fase del fly-by C11 dove il criterio sul rapporto tra riflettività è soddisfatto (punti verdi in Figura 4.3). Le zone di interesse evidenziate sono impact crater morphologies and catenae (rosa), dark ray, floor and halo craters (verde) e bright terrain/Grooves and fractures (giallo) [12].

possono essere dedotte le diverse caratteristiche meccaniche del ghiaccio, quindi della crosta ghiacciata [12].

Usando ora i coefficienti ricavati sopra nelle equazioni 3.11 e 3.10, la conoscenza della traiettoria di JUICE e i dati riportati in tabella 3.1 nell'equazione 3.2, è stato tracciato un grafico delle P_R (Figura 4.5). Anche questa volta ci si è limitati ai punti che soddisfano la condizione sul rapporto tra riflettività, come in Figura (4.5). Si trovano sulle ascisse gli angoli di incidenza, in ordine crescente, mentre sulle ordinate la potenza P_R espressa in dB. Tenendo a mente che le potenze sono riportate con colori diversi per polarizzazioni diverse, si può notare come queste risultino le medesime in prossimità dell'angolo di Brewster (punto rosso in Figura 4.5).

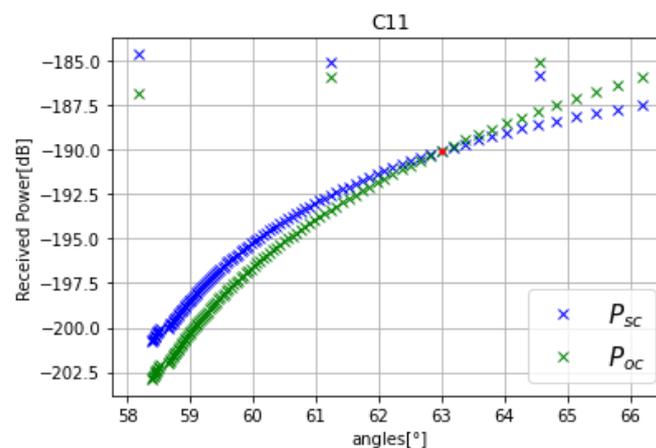
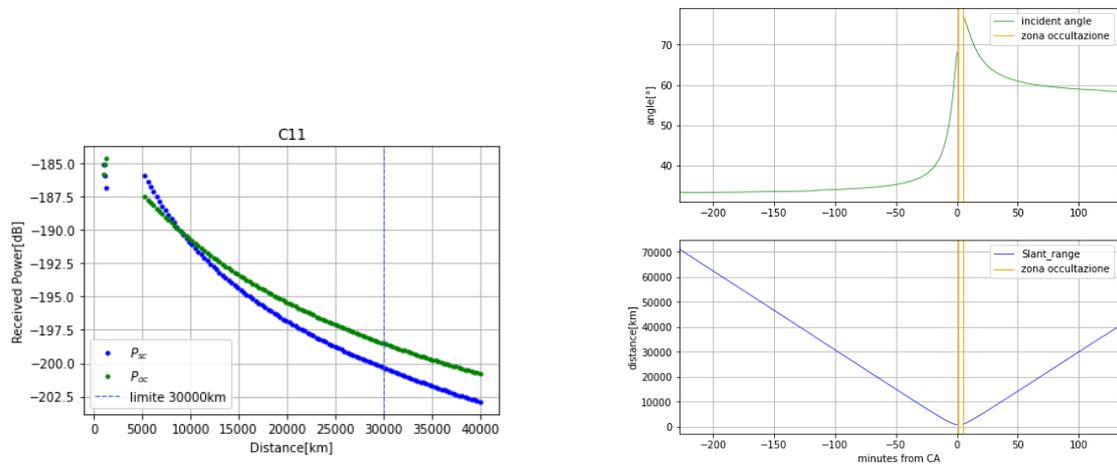


Figura 4.5: grafico P_R in ambedue le polarizzazioni, rappresentato in funzione dell'angolo

Dalla Figura 4.5 è evidente come la potenza della componente LCP/OC sia maggiore di quelle legate alla componente R_{SC} ad angoli minori dell'angolo di Brewster. Il trend tende ad invertirsi ad angoli via via crescenti. Questo comportamento è legato direttamente al grafico 4.2, ma non lo spiega del tutto. Visualizzando il grafico 4.6b, si nota come dopo il closest approach gli angoli decrescano mentre lo slant-range vada crescendo. Quindi nei punti dove compaiono alti valori di angoli si trovano anche bassi valori di slant-range. Essendo la potenza ricevuta inversamente proporzionale al quadrato dello slant-range, questa cresce. Per lo stesso motivo, si possono notare in Figura 4.6a tre coppie di punti che appaiono come outliers intorno a -186 dB. Per comprenderne l'origine sono stati rappresentati i grafici 4.6a e 4.6b.



(a) Andamento delle potenze in funzione dello slant-range

(b) Evoluzione degli angoli di incidenza (in alto) e slant-range in funzione del tempo(in basso). La zona delineata in arancione è una zona di occultazione geometrica

Figura 4.6: Grafici di C11, delle potenze in funzione dello slant-range e dell'angolo e slant range in funzione del tempo

Nel grafico 4.6a è riportata la potenza ricevuta in funzione dello slant-range, mentre nel grafico 4.6b sono riportati lo slant-range e l'angolo di incidenza in funzione del tempo. Quest'ultimo è espresso in termini di minuti dal closest approach (CA), ovvero il punto di minima distanza di JUICE da Callisto. Da notare che in Figura 4.6b la zona delineata in arancione è una zona di occultazione geometrica. Prestando attenzione, risulta visibile che l'andamento delle potenze in funzione dello slant-range ha un comportamento inverso rispetto a quello che avrebbe in funzione degli angoli. È evidente che le P_R sono massime quando la distanza è minima, e dal grafico 4.6b si nota che quando la distanza diminuisce l'angolo aumenta e viceversa. Questo significa che i punti outliers si trovano prima del CA. Unendo queste considerazioni alle ipotesi fatte sul range di angoli interessanti, sappiamo che quegli apparenti outliers occorrono semplicemente in concomitanza con una rapida variazione della geometria prima del CA.

Una volta calcolate le potenze, è possibile calcolare l'SNDR, spostando il focus su come questo si comporti durante l'arco di osservazione. Usiamo le potenze mostrate nel grafico 4.5, per calcolare il signal to noise density ratio nella finestra di tempo di ± 3 ore. È stata ipotizzata una temperatura di sistema di 28.5 K alla stazione di Malargue ad un elevazione di 50° in condizione di cielo sereno e ricavato l'SNDR per tutte e due le componenti, RCP ed LCP, seguendo quando fatto in [2].

In accordo con i valori di P_R ricavati sopra, usando la formula 3.14, si mostrano i valori di SNDR nel pannello in alto di Figura 4.7.

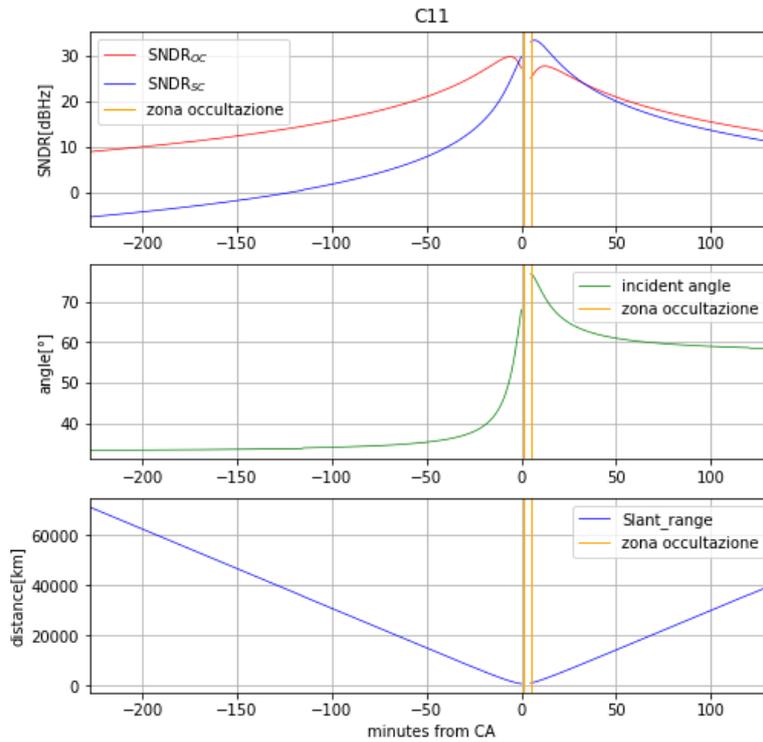


Figura 4.7: Parametri rilevanti durante il fly-by C11 mostrati su un intervallo di tempo di 6 ore ed espresso in termini di minuti dal closest approach. (in alto) SNDR. (centro) Angoli di incidenza. (in basso) slant-range.

Questa presenta sulle ascisse il tempo, prendendo come zero il CA. L'intervallo, di 6 ore viene diviso in 2 parti in base alla posizione del CA: i tempi negativi precedono il CA, mentre tempi positivi vengono dopo questo. Sulle ordinate si trova invece L'SNDR espresso in dBHz. Innanzitutto, concentrandosi sull'SNDR, in prossimità del CA, si vedono dei punti di massimo per l'effetto combinato di angoli e distanza da Callisto. Osservando ulteriormente il grafico, è possibile notare delle zone di discontinuità del segnale delineate da una coppia di rette verticali arancioni che evidenziano le zone di occultazioni geometriche. Queste avvengono quando la trasmittente JUICE si trova oscurata da Callisto rispetto ad un osservatore posto sulla Terra. Come si può evincere dal grafico, poco prima che vi sia l'occultazione, gli angoli di incidenza tendono a crescere velocemente, segno che JUICE si stia avvicinando alla posizione limite in cui il vettore ricevente è parallelo a quello trasmittente, dopo la quale JUICE si trova oscurato da Callisto.

Al di sotto del pannello relativo all'SNDR si trovano altri due grafici che presentano l'andamento degli angoli di incidenza e dello slant-range nel tempo. Questi sono molto utili per visualizzare la geometria di osservazione del satellite all'interno della finestra temporale.

La Figura 4.8 è una rappresentazione riassuntiva di quale sia la finestra temporale nella quale la condizione di merito sul rapporto tra riflettività venga soddisfatta. Per l'analisi si è scelto come valore minimo apprezzabile di segnale-rumore un valore di 10 dBHz, in continuità con [2]. Questa è una condizione necessaria ma non sufficiente, affinché uno punti speculari venga considerato, infatti questo valore sarà un lower bound prima del quale il segnale viene scartato. Entrambi i segnali, nelle due polarizzazioni, devono superare i 10 dBHz per garantire un calcolo accurato della riflettività. In caso contrario, l'assenza di misure affidabili delle potenze in entrambe le polarizzazioni compromette l'accuratezza del risultato.

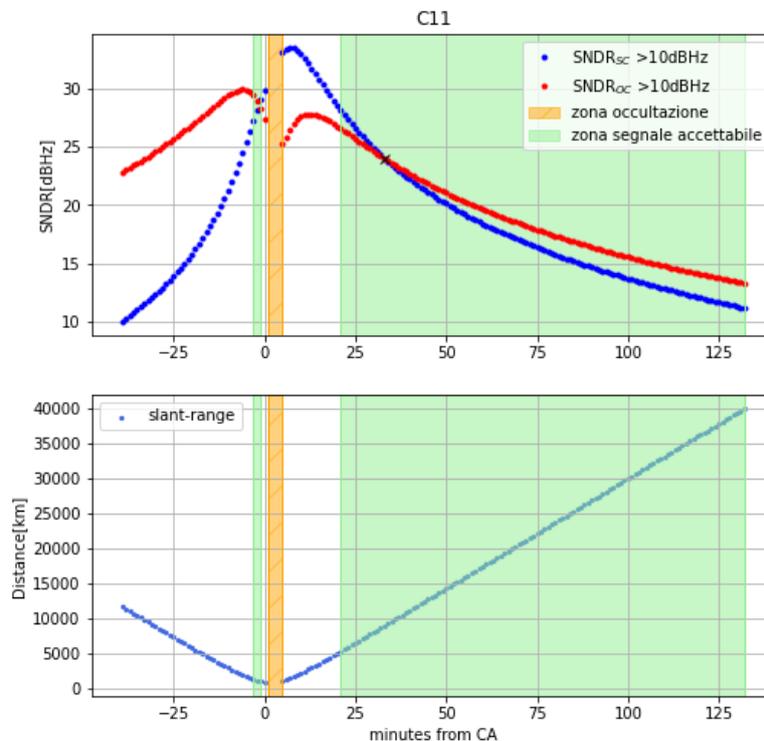


Figura 4.8: Il primo grafico rappresenta gli SNDR rispettivi ai punti speculari del fly-by C11 con intensità maggiore di 10dBHz nel tempo di osservazione. Il secondo grafico mostra l'andamento dello slant-range in funzione del tempo, sempre rispetto ai punti con intensità maggiore di 10dBHz. Compaiono delle zone in arancione, che indicano occultazione geometrica e zone in verde le quali indicano le finestre in cui il rapporto delle riflettività nelle due polarizzazioni si trova all'interno del range descritto nei criteri 4.1. In azzurro tratteggiato troviamo invece da quale minuto lo slant-range supera i 30000km

Si mostrano in Figura 4.8 due grafici, l'SNDR relativo ai punti speculari con intensità maggiore di 10 dBHz in alto, e lo slant-range relativo a questi punti in basso. In arancione è rappresentata l'area di occultazione geometrica, durante la quale la trasmittente risulta oscurata da Callisto rispetto alla Terra. In verde sono

evidenziate le aree in cui il rapporto tra riflettività polarizzate ortogonalmente è compreso tra 0.5 e 1.5. Questa rappresentazione mostra la loro collocazione rispetto al CA. Infine in azzurro e con tratto tratteggiato è riportata una linea verticale che indica il limite in cui lo slant-range supera i 30000km.

Tra -3 e -1 minuti dal CA e tra 21 e 132 minuti dal CA esistono due finestre di osservazione, rispettivamente di 3 e 112 minuti, per un totale di 115 minuti di osservabilità. Da questa finestra è necessario togliere 32 minuti, dato che dal minuto 100 il satellite si allontanerà oltre i 30000 km dal punto speculare. Il tempo totale sarà quindi di 83 minuti con una finestra tra -3 e -1 e tra 21 e 100. In questi 83 minuti il punto speculare coprirà 1395 km sulla traccia a terra, con una velocità media di 3.94km/s nella prima finestra e di 0.19 km/s nella seconda (intervalli rappresentati in verde Figura 4.8). La finestra di osservazione minore può essere esclusa, poiché dalla traccia a terra si nota che quei tre punti si trovano tra (60°N, 30°N) e (90°W, 30°W), dove non sono presenti zone di interesse (vedi Figura 4.3).

si considera ora la seconda finestra verde del grafico 4.8 da 21 a 100 minuti, che ricade interamente in Figura 4.4. Nel grafico 4.8 è evidenziato con una X il punto di intersezione delle due curve, corrispondente all'angolo di Brewster, per facilitare il confronto tra la posizione dei punti speculari in Figura 4.4 e l' SNDR in Figura 4.8. Troviamo quindi che il 70% dei punti appartenenti al quadrante risultano validi per l'esperimento bistatico, con un intervallo di SNDR medio tra le due polarizzazioni compreso tra [27.3 dBHz, 14.9 dBHz] .

Come nota finale a valle di questa analisi, è da tener conto che i punti riportati nelle tracce a terra presentate sono solamente il centro nominale dell'area illuminata dall'antenna di JUICE. Questo significa che anche punti non esattamente all'interno delle aree di interesse potrebbero contribuire all'osservazione di queste in caso di superficie molto rugosa. Tenendo a mente questo concetto ed osservando la Figura 4.4, si può vedere come molti punti che si trovano in prossimità delle zone di studio possano risultare comunque validi per il lavoro, nonostante non rientrino direttamente all'interno delle aree stesse.

4.3 Fly-by C7

Mantenendo le stesse ipotesi prese per C11, presentiamo i risultati di C7. Questo fly-by risulta valido in rapporto alle finestre di tempo e numero di punti all'interno di zone di interesse. C7 soddisfa la prima ipotesi sul rapporto tra le riflettività con un totale di 94 punti, 72 dei quali rispettano il requisito sullo slant-range minore di 30000 km, quasi un 77%.

In Figura 4.9 è riportato il grafico dei coefficienti di Fresnel in funzione degli angoli.

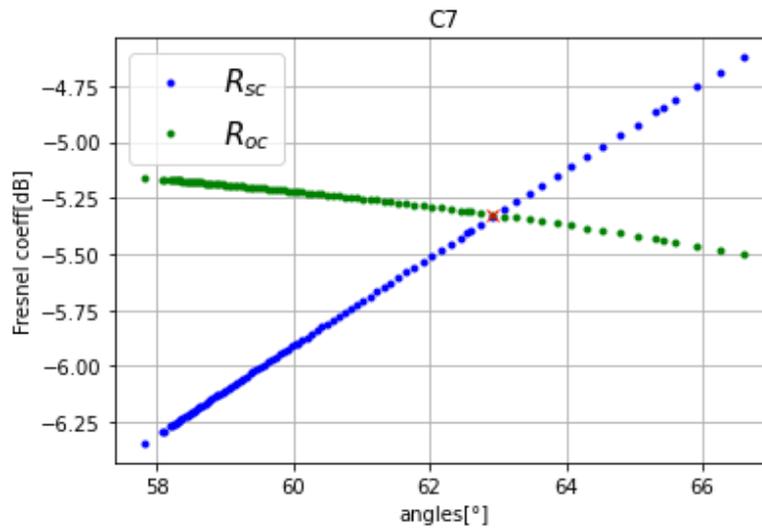
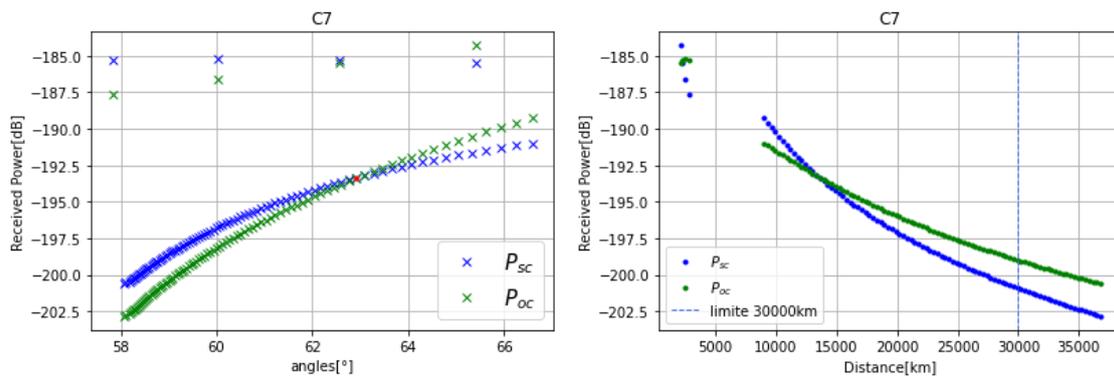


Figura 4.9: Coefficienti di Fresnel rappresentati in funzione dell'angolo

Vale la pena mostrare la potenza ricevuta P_R sia in funzione dell'angolo che in funzione dello slant-range. Le considerazioni sugli apparenti outliers sono le medesime mostrate per il fly-by C11.



(a) Andamento delle potenze in funzione dell'angolo di incidenza

(b) Andamento delle potenze in funzione dello slant-range

Figura 4.10: Grafici che mostrano l'andamento della potenza di C7 in funzione dei diversi parametri

I punti speculari di C7 intersecano diverse aree di interesse tra le quali l'Area 7.9 (L'area arancione in Figura 4.14b) e l'Area 5.8 (L'area azzurra in Figura 4.14a). La zona 7.9 corrisponde ad un ancient dark terrain, ed è importante per determinare la possibile presenza di composti di carbonio. Difatti, i terreni oscuri si pensano ricoperti di una regolite dall'origine ancora poco nota. Può essere anche sia materiale non appartenente a Callisto ma proveniente da meteoriti. Si vuole studiare queste zone più antiche, dove i fenomeni ambientali hanno portato alla modifica del terreno (sublimazione, bombardamenti di micrometeoriti, ecc..) per capire come questi influiscano sulla morfologia e la composizione di Callisto [12]. La zona 5.8 rientra tra i Bright Ray terrains. Queste sono le aree più popolate in termini di crateri e possono dare informazioni sulle proprietà meccaniche del ghiaccio, nonché sulla crosta ghiacciata di Callisto.

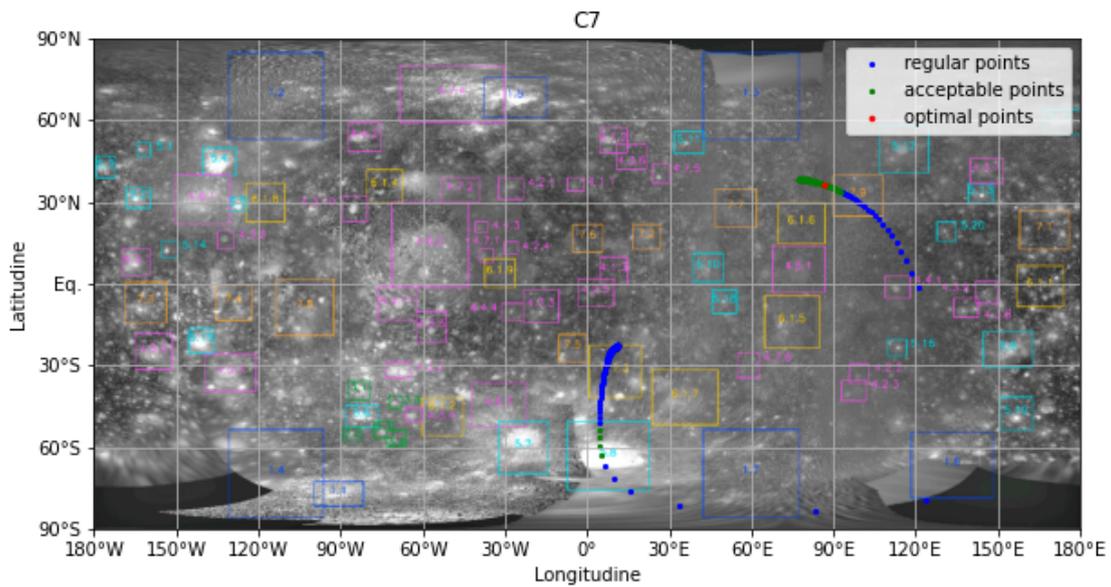


Figura 4.11: Traccia a terra dei punti speculari durante il fly-by C7. Questi sono evidenziati con colori diversi in base al diverso grado di soddisfacimento del criterio di merito basato sull'angolo di incidenza secondo le categorie introdotte all'inizio della sezione 4.2: Accettabile (verde), non accettabile (blu) e ottimo (rosso). La mappa di Callisto è presa dallo studio [12] riporta con riquadri di colori diversi le zone di interesse sulla superficie (si veda anche Figura 2.3)

Dopo la traccia a terra, si riporta l'SNDR di C7 (Figura 4.12). Come si può notare la zona di occultazione è leggermente maggiore del C11, e dura circa 5 minuti in più.

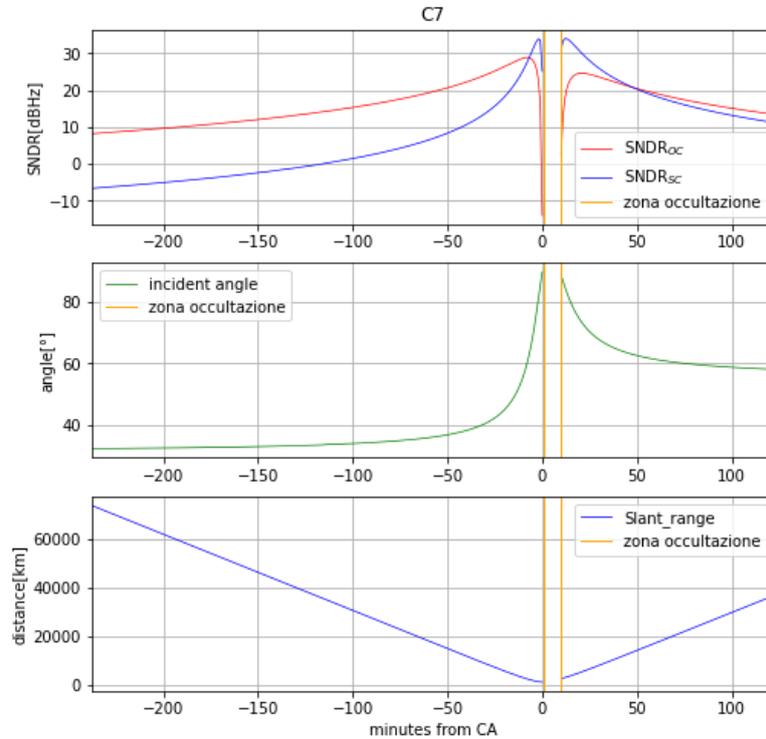


Figura 4.12: Parametri rilevanti durante il fly-by C7 mostrati su un intervallo di tempo di 6 ore ed espresso in termini di minuti dal closest approach. (in alto) SNDR. (centro) Angoli di incidenza. (in basso) slant-range.

Infine, come fatto per il precedente fly-by, si mostra il grafico sui punti aventi intensità del SNDR maggiore di 10dBHz in Figura 4.13 Dal grafico, analogamente a quanto visto per C11, si individuano due finestre di osservazione: la prima tra -9 e -6 minuti dal CA e la seconda tra 33 e 122 minuti dal CA. In questo caso, la prima finestra della durata di circa 4 minuti ha una traccia del punto speculare che rientra nell'area di interesse 5.8 come si vede in Figura 4.14a. In questa finestra di osservazione il satellite ha una velocità media di 2.18 km/s.

Nella seconda finestra di osservazione 4.14b, il punto speculare attraversa la zona gialla 7.9 per circa 7 minuti, dall'inizio della finestra verde in Figura 4.13 (tra 33 e 40 minuti dal CA), con una velocità media di 0.13 km/s. Dopo, prosegue per circa 60 minuti con un rapporto di riflettività favorevole, sebbene al di fuori delle principali aree di interesse. Questo permetterebbe di raccogliere altri dati tramite l'esperimento di radar bistatico su rugosità e altri parametri di Callisto. Considerando le due finestre di tempo il satellite percorre quindi 903 km. Per quel che concerne lo SNDR di queste finestre, abbiamo per la finestra 4.14a, un valore compreso tra un massimo di 29.2dBHz e un minimo di 27.6dBHz. Mentre la finestra in fig 4.14b ha un SNDR compreso tra 23.9dBHz e 14.47dBHz.

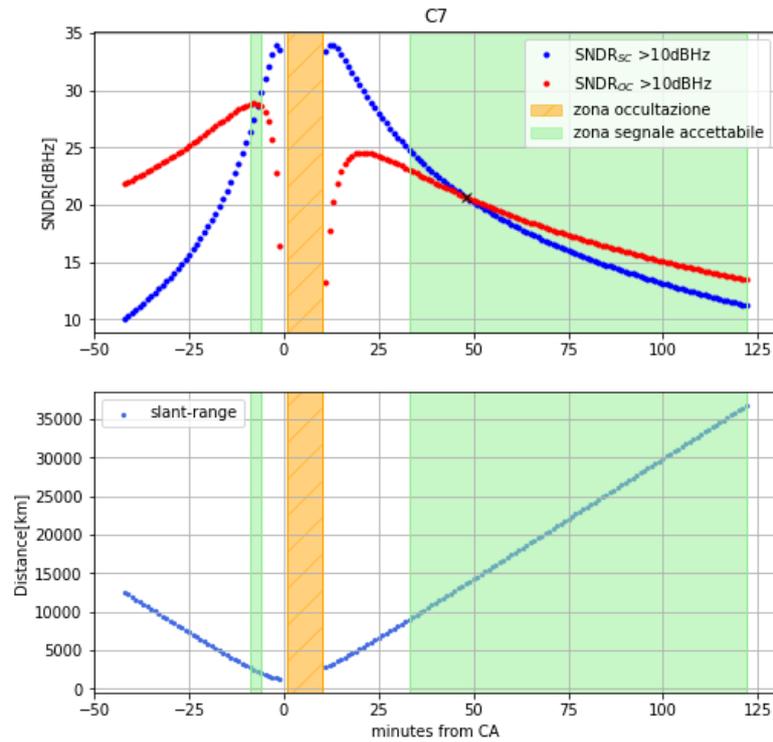
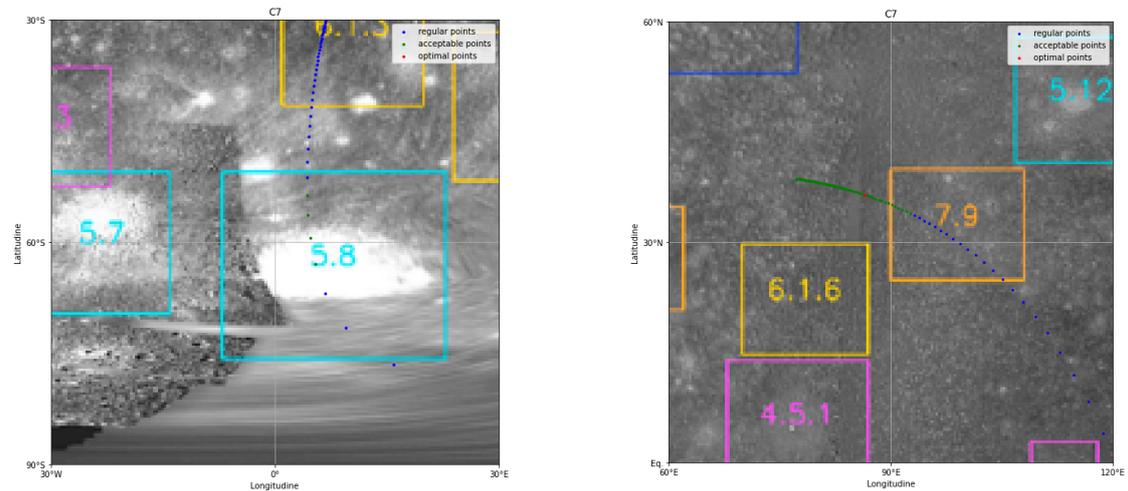


Figura 4.13: Il primo grafico rappresenta gli SNDR rispettivi ai punti speculari del fly-by C7 con intensità maggiore di 10dBHz nel tempo di osservazione. Il secondo grafico mostra l'andamento dello slant-range in funzione del tempo, sempre rispetto ai punti con intensità maggiore di 10dBHz. Compaiono delle zone in arancione, che indicano occultazione geometrica e zone in verde le quali indicano le finestre in cui il rapporto delle riflettività nelle due polarizzazioni si trova all'interno del range descritto nei criteri 4.1. In azzurro tratteggiato troviamo invece da quale minuto lo slant-range supera i 30000 km



(a) Quadrante 1:
prima finestra di
osservazione C7 (situata prima del CA)

(b) Quadrante 2:
seconda finestra di
osservazione C7 (situata dopo del CA)

Figura 4.14: Soddisfacimento dei criteri di merito dell'osservazione bistatica riportati sulla traccia a terra del punto speculare durante il fly-by C7

4.4 Fly-by C6

C6, con un totale di 167 punti all'interno del range sui rapporti tra riflettività, dei quali 52 punti aventi slant-range inferiore ai 30000 km, si inserisce al terzo posto della classifica. C6 mostra lo stesso comportamento dei coefficienti di Fresnel in funzione dell'angolo di C11 (Figura 4.15).

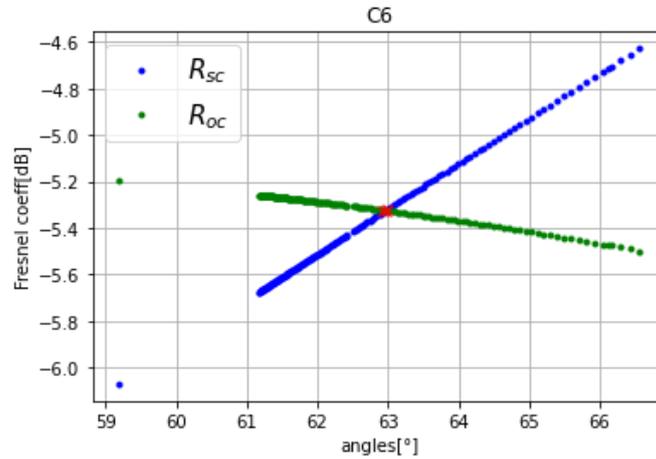
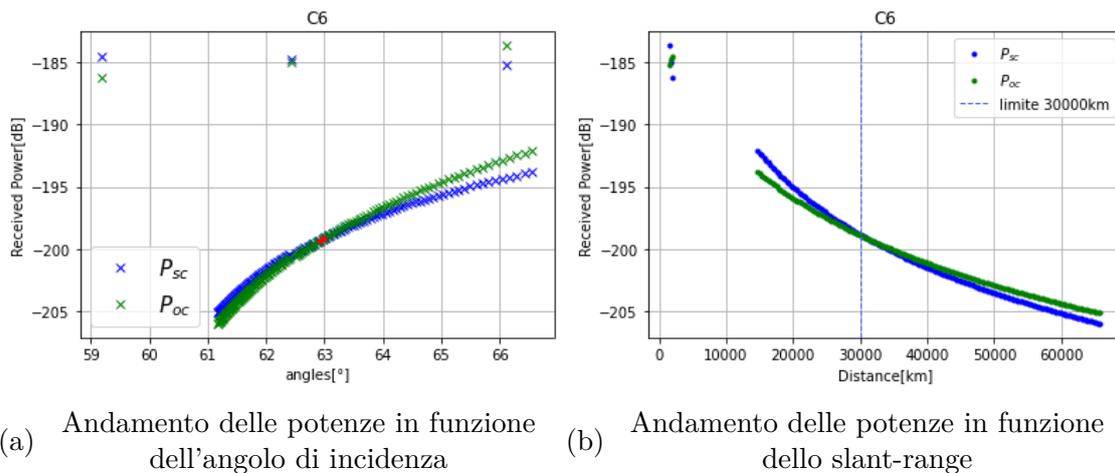


Figura 4.15: Coefficienti di Fresnel in funzione dell'angolo di incidenza per il fly-by C6

Nelle Figure 4.16a, 4.16b viene mostrata la potenza, prima in funzione dell'angolo, dopo in funzione dello slant-range. Ancora una volta il grafico 4.16a, presenta degli apparenti outliers intorno a -185dB. Come per C11 se seguissimo l'evoluzione temporale dei coefficienti durante il fly-by, si vedrebbe una crescita angolare tra uno punto speculare e quello successivo prima del CA e una diminuzione angolare dopo di questo. Mostrando invece la potenza in funzione degli angoli si vede solo la concentrazione di punti in base agli angoli stessi e il fenomeno non viene mostrato. Dipende quindi dalla scelta rappresentativa.



(a) Andamento delle potenze in funzione dell'angolo di incidenza

(b) Andamento delle potenze in funzione dello slant-range

Figura 4.16: Grafici che mostrano l'andamento della potenza di C6 in funzione dei diversi parametri

In Figura 4.17 è rappresentata la traccia a terra di C6, che è molto simile alla precedente di C7 (Figura 4.11). I punti speculari restituiscono un SNDR leggermente diverso da quello di C7, come mostrato in Figura 4.13. In questo caso la finestra di occultazione è maggiore.

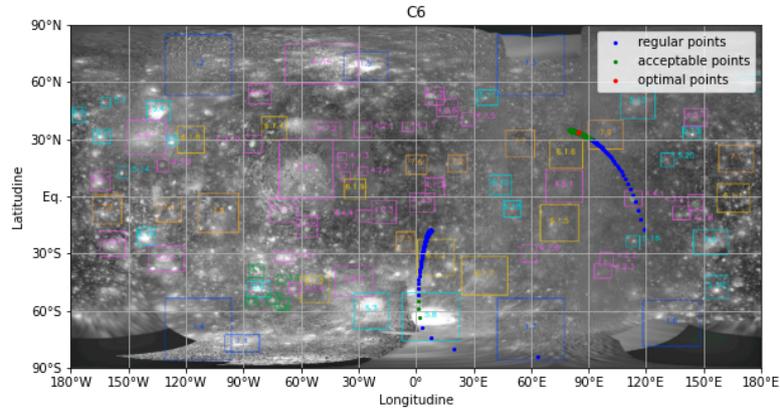


Figura 4.17: Traccia a terra dei punti speculari durante il fly-by C6. Questi sono evidenziati con colori diversi in base al diverso grado di soddisfacimento del criterio di merito basato sull'angolo di incidenza secondo le categorie introdotte all'inizio della sezione 4.2: Accettabile (verde), non accettabile (blu) e ottimo (rosso). La mappa di Callisto è presa dallo studio [12] riporta con riquadri di colori diversi le zone di interesse sulla superficie (si veda anche Figura 2.3)

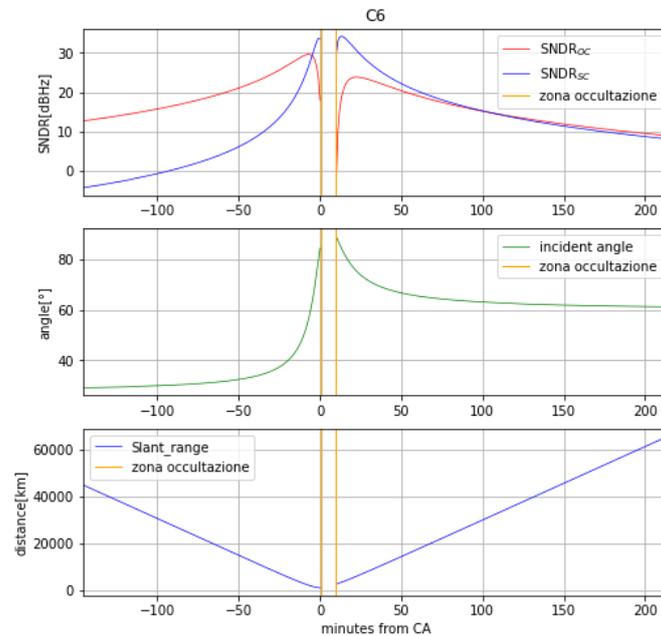


Figura 4.18: Parametri rilevanti durante il fly-by C6 mostrati su un intervallo di tempo di 6 ore ed espresso in termini di minuti dal closest approach. (in alto) SNDR. (centro) Angoli di incidenza. (in basso) slant-range.

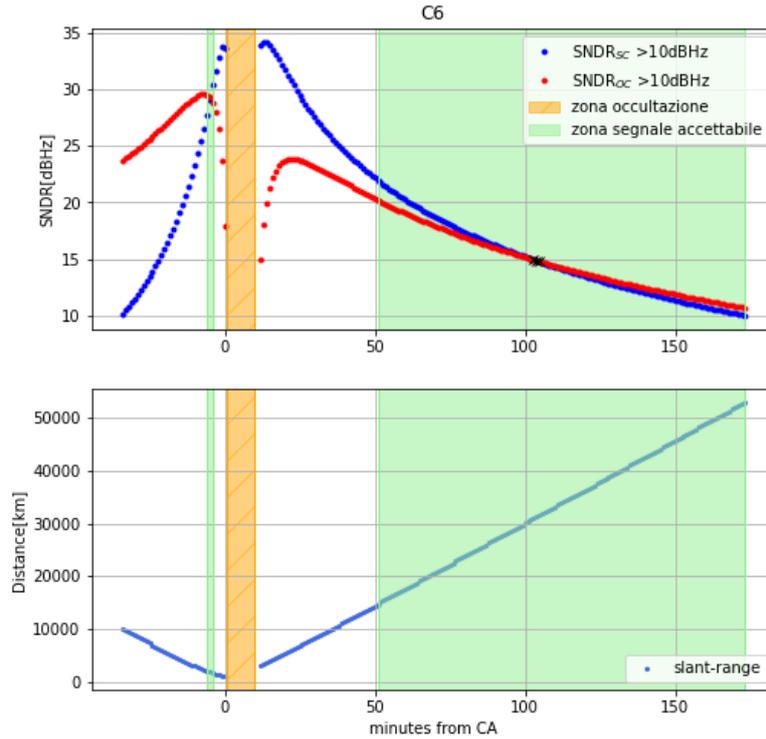


Figura 4.19: Il primo grafico rappresenta gli SNDR rispettivi ai punti speculari del fly-by C6 con intensità maggiore di 10dBHz nel tempo di osservazione. Il secondo grafico mostra l'andamento dello slant-range in funzione del tempo, sempre rispetto ai punti con intensità maggiore di 10 dBHz. Compaiono delle zone in arancione, che indicano occultazione geometrica e zone in verde le quali indicano le finestre in cui il rapporto delle riflettività nelle due polarizzazioni si trova all'interno del range descritto nei criteri 4.1

Nella Figura 4.19 sono nuovamente distinguibili due finestre temporali di osservazione. La prima, tra -6 e -4 minuti dal CA, corrisponde ai punti speculari situati nell'intervallo $[30^{\circ}\text{W}, 30^{\circ}\text{E}]$ e $[90^{\circ}\text{S}, 60^{\circ}\text{S}]$ (Figura 4.20a), con un SNDR medio compreso tra 29.6 dBHz e 28.6 dBHz. Come nel fly-by C7, in questa regione i punti speculari avranno una velocità media di 2.98 km/s e attraverseranno la zona 5.8, mantenendo lo stesso tempo di osservazione. La seconda finestra, successiva al CA, si estende tra 51 e 99 minuti e riguarda i punti compresi tra $[90^{\circ}\text{E}, 120^{\circ}\text{E}]$ e $[0^{\circ}, 60^{\circ}\text{N}]$, con un SNDR medio che varia tra 21.0 dBHz e 15.5 dBHz (Figura 4.20b). In questa fase i punti speculari avranno una velocità media di 90 m/s e attraverseranno la zona 7.9, caratterizzata da un numero di punti inferiore rispetto alla precedente, ma comunque comparabile.

La distanza totale percorsa dai punti speculari sulla traccia a terra si aggira attorno ai 619 km, quasi un terzo inferiore a C7. Per tutti questi motivi, il fly-by C6 rappresenta un'alternativa valida a C7 nel caso in cui l'esperimento non potesse essere condotto durante il fly-by C7, ma ci sia un forte interesse scientifico nel voler investigare le regioni 5.8 e 7.9

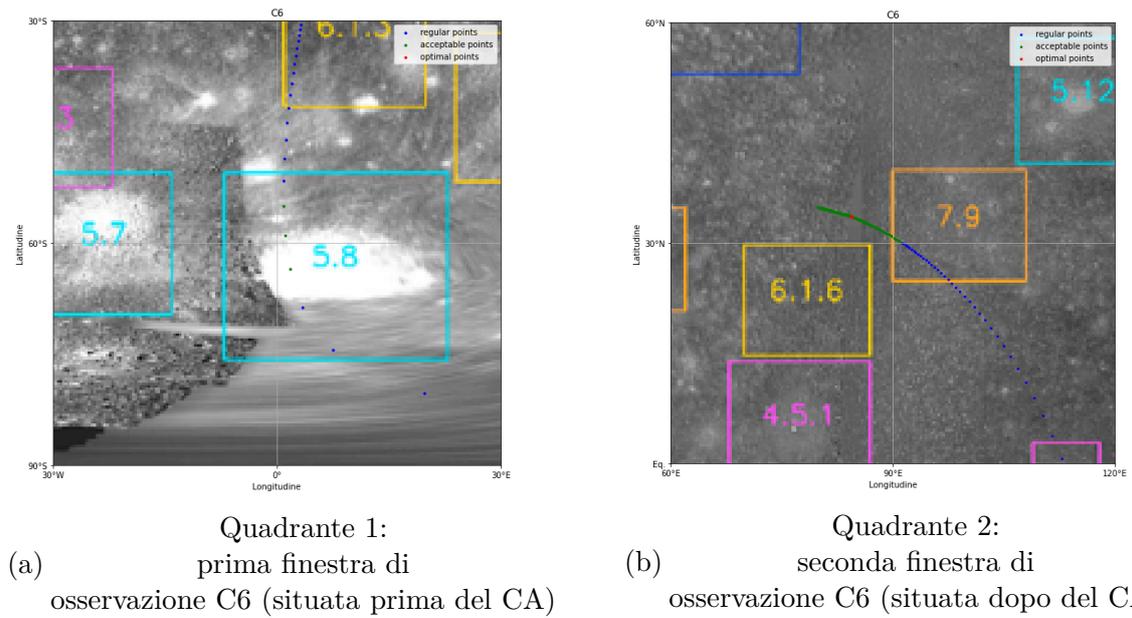


Figura 4.20: Soddisfacimento dei criteri di merito dell'osservazione bistatica riportati sulla traccia a terra del punto speculare durante il fly-by C6

Capitolo 5

Conclusioni

In conclusione, l'obiettivo del lavoro svolto era quello di determinare le finestre di opportunità interessanti al fine di compiere esperimenti di radar bistatico su Callisto con la missione JUICE. Si è dunque svolto un primo lavoro sulla geometria ed in seguito sulle potenze attese a Terra a valle di una riflessione quasi-speculare dalla superficie di Callisto.

Partendo dai punti speculari acquisiti nel lavoro di tirocinio e dalla conseguente modellazione della geometria del radio-link (angolo di incidenza, distanze del punto speculare, ecc.), si sono calcolati i coefficienti di Fresnel per un valore di costante dielettrica superficiale pari a 3.84. Questi sono stati moltiplicati per la radar cross-section di una sfera a conducibilità perfetta, e infine si è calcolata la potenza riflessa totale usando l'equazione radar per ogni punto speculare.

Con un modello di potenza ricevuta durante ciascun fly-by a disposizione, si è introdotta una serie di criteri di merito per poter selezionare finestre di opportunità particolarmente favorevoli all'osservazione bistatica di Callisto.

Per prima cosa, si è selezionato un intervallo di rapporti tra le riflettività in entrambe le polarizzazioni compreso tra [0.5,1.5]. Come seconda cosa, è stato imposto che la traccia a terra dei punti speculari passasse su zone di interesse scientifico/geologico. Infine, abbiamo imposto che la distanza di JUICE da Callisto fosse inferiore a 30.000 km, seguendo un criterio simile a quello adottato per gli esperimenti bistatici della sonda Cassini.

n° fly-by	Data CA	altitudine (km)	velocità (km/s)
C6	2032-10-30T20:54:33	236.22	5.71
C7	2032-11-16T13:16:16	200.02	5.72
C11	2033-05-10T16:19:00	1838.86	5.54

Tabella 5.1: Tabella riassuntiva dei fly-by analizzati nel dettaglio

L'analisi svolta ha portato a 3 fly-by , rispettivamente C6, C7 e C11. In tabella 5.1 sono riportate le date, le velocità e le altitudini al closest approach. Il lavoro svolto offre quindi 3 fly-by all'interno della fase scientifica che potrebbero essere approfonditi in studi futuri. Tra questi sussiste una finestra di tempo di 6 mesi osservando in tabella 5.1.

fly-by	Minuti totali	distanza percorsa
C6	52	619 km
C7	72	903 km
C11	83	1395 km

Tabella 5.2: Tabella che riporta i minuti osservabilità e la distanza percorsa dai punti speculari in rapporto ai criteri del paragrafo 4.1

In tabella 5.2 sono rappresentati distanza percorsa sulla traccia a terra e numero di minuti di osservazione dei 3 fly-by migliori.

Oltre a questi, altri fly-by potrebbero essere promettenti, e potrebbero avere il potenziale per un lavoro futuro a giudicare dal contenuto dell'istogramma di Figura 4.1. Ad esempio i fly-by C12, C13, C14, nonostante il numero esiguo di punti per il passo temporale proposto, portano buoni livelli di distanza percorsa sulla traccia a terra.

Occorre ribadire che questo vuole essere un lavoro preliminare basato su alcune ipotesi semplificative. Per lavori futuri, sarebbe necessaria un'analisi più approfondita partendo da quanto detto. La caratterizzazione della riflessione speculare dalla superficie, infatti, richiederebbe modelli più complessi che tengano conto non solo dello riflessione quasi-speculare superficiale, come fatto durante lo studio proposto, ma anche di altri meccanismi quali scattering diffuso e di sottosuperficie. Inoltre, in questa analisi non si è tenuto conto dell'effetto dello spectral broadening sull'effettiva visibilità del segnale rispetto al rumore e alla sua varianza.

Effettuando esperimenti di radar bistatico durante i fly-by qui presentati come validi, si potranno esplorare zone come la 5.8, 7.9, la 6.1.2 e la 4.3.4. Queste presentano caratteristiche diverse, ma sempre restano all'interno degli obiettivi scientifici di JUICE. Troviamo infatti Dark terrains, zone più antiche di Callisto ricoperte da una regolite nera. Queste zone essendo più vecchie sono state esposte maggiormente ai fenomeni ambientali, perciò sono utili allo studio di morfologia, topografia e composizione di Callisto. Inoltre potrebbero contenere possibili composti a base di carbonio; è possibile osservare impact crater morphologies, utili per capire le caratteristiche meccaniche del ghiaccio e della crosta di Callisto; o ancora bright terrain, la cui formazione su Callisto è oggetto di studio. Aumentare la comprensione di tutti questi fenomeni è fondamentale a caratterizzare meglio la struttura di queste lune ghiacciate. Ribanendo ancora, l'obiettivo della missione JUICE è determinare se in questo tipo di sistemi vi siano condizioni favorevoli alla vita. Per fare ciò è necessario studiare l'ambiente in cui essi si trovano. I risultati del lavoro proposto potranno essere la base per lo svolgimento di approfondimenti futuri che permettano il raggiungimento degli obiettivi di missione.

L'analisi dei dati raccolti con esperimenti bistatici sulle lune ghiacciate saranno utili al fine di comprendere meglio le caratteristiche del sistema Giove e delle interazioni tra Giove stesso e le sue lune. Raccogliendo informazioni sulle regioni di interesse scientifico/geologico, verrà migliorata la comprensione fisica del Sistema Solare e di come certe strutture al suo interno si ripetano anche al di fuori di esso.

Bibliografia

- [1] J.D. Anderson et al. «Shape, Mean Radius, Gravity Field, and Interior Structure of Callisto». In: *Icarus* 153.1 (2001), pp. 157–161. DOI: <https://doi.org/10.1006/icar.2001.6664>.
- [2] Giancorrado Brighi. «Probing the surface of Ganymede by means of bistatic radar with the JUICE mission». In: *Materials Research Proceedings* 33 (2023).
- [3] Robert W. Carlson. «A Tenuous Carbon Dioxide Atmosphere on Jupiter’s Moon Callisto». In: *Science* 283.5403 (1999), pp. 820–821. DOI: 10.1126/science.283.5403.820. eprint: <https://www.science.org/doi/pdf/10.1126/science.283.5403.820>. URL: <https://www.science.org/doi/abs/10.1126/science.283.5403.820>.
- [4] ESA. *JUICE FACTSHEET*. URL: https://www.esa.int/Science_Exploration/Space_Science/Juice/Juice_factsheet.
- [5] ESA. *JUICE PAYLOAD*. URL: <https://www.cosmos.esa.int/web/juice/payload#>.
- [6] Essam Heggy et al. «Radar probing of Jovian icy moons: Understanding subsurface water and structure detectability in the JUICE and Europa missions». In: *Icarus* 285 (2017), pp. 237–251. ISSN: 0019-1035. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2016.11.039>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0019103516307953>.
- [7] G. W. Hill. «Researches in the Lunar Theory». In: *American Journal of Mathematics* 1.1 (1878), pp. 5–26. ISSN: 00029327, 10806377. URL: <http://www.jstor.org/stable/2369430> (visitato il giorno 06/06/2024).
- [8] W. B. Hubbard e R. Smoluchowski. «Structure of Jupiter and Saturn». In: *Space Science Reviews* 14.5 (1973), pp. 599–662. ISSN: 1572-9672. DOI: 10.1007/BF00166644. URL: <https://doi.org/10.1007/BF00166644>.
- [9] H. Hussmann et al. *JUICE JUpiter ICy moons Explorer: Exploring the emergence of habitable worlds around gas giants*. Vol. ESA/SRE. Definition Study Report. ESA, 2014.
- [10] Richard A. Simpson e G. Leonard Tyler. «Viking bistatic radar experiment: Summary of first-order results emphasizing north polar data». In: *Icarus* 46.3 (1981), pp. 361–389. ISSN: 0019-1035. DOI: [https://doi.org/10.1016/0019-1035\(81\)90139-1](https://doi.org/10.1016/0019-1035(81)90139-1). URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0019103581901391>.

-
- [11] Richard A. Simpson et al. «Polarization in Bistatic Radar Probing of Planetary Surfaces: Application to Mars Express Data». In: *Proceedings of the IEEE* 99.5 (2011), pp. 858–874. DOI: 10.1109/JPROC.2011.2106190.
- [12] K. Stephan et al. «Regions of interest on Ganymede’s and Callisto’s surfaces as potential targets for ESA’s JUICE mission». In: *Planetary and Space Science* 208 (2021), p. 105324. ISSN: 0032-0633. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pss.2021.105324>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S003206332100163X>.