

# Analisi preliminare di sistemi a microonda *Moon-based* per l'osservazione dell'Universo

Alfredo Renga<sup>1</sup>, Maria Rosaria Santovito<sup>1</sup>, Giovanni Alberti<sup>1</sup>, Gemma Manoni<sup>2</sup>, Stefania Mattei<sup>1</sup>

<sup>1</sup>CO.RI.S.T.A., Consorzio di Ricerca su Sistemi di Telesensori Avanzati, viale J.F. Kennedy 5, 80125 Napoli,

<http://www.corista.unina.it>

<sup>2</sup>Alcatel Alenia Space Italia, via Saccomuro 24, 00131 Roma.

**Abstract**— CO.RI.S.T.A. ed Alcatel Alenia Space Italia hanno condotto uno studio preliminare per lo sviluppo di sistemi a microonda *Moon-based* per l'osservazione dell'Universo. Sono stati analizzati vantaggi e limiti di un radiotelescopio sul *far-side* lunare, rispetto ad un radiotelescopio terrestre o in orbita terrestre.

L'analisi ha evidenziato che la realizzazione e l'installazione di tali radiotelescopi costituisce una sfida di alto valore scientifico e tecnologico, realizzabile intorno al 2020/2025. Lo studio è tuttora in corso ed i risultati finali sono attesi per luglio del 2007.

## I. INTRODUZIONE

ESISTE un rinnovato interesse internazionale riguardo lo studio, l'esplorazione e lo sfruttamento della Luna, testimoniato dai programmi delle principali agenzie spaziali mondiali. In questo contesto l'ASI, Agenzia Spaziale Italiana, sta sviluppando uno studio, tuttora in corso, denominato *Italian Vision for Moon Exploration* (IVME), quale tassello italiano all'interno dello scenario internazionale. IVME è costituito da tre grossi temi: lo studio della Luna, l'utilizzo della Luna come piattaforma di osservazione dell'Universo e l'utilizzo della Luna come piattaforma di osservazione della Terra.

CO.RI.S.T.A. ed Alcatel Alenia Space Italia nell'ambito del progetto IVME, stanno conducendo studi di definizione e sviluppo di payload a microonde per tutti e tre i temi sopra indicati. Il presente lavoro richiama i risultati preliminari relativi al progetto di sistemi di osservazione radioastronomica dal *far-side* lunare.

L'idea di utilizzare la Luna come finestra privilegiata per l'osservazione dell'Universo non è nuova, i primi studi risalgono agli anni sessanta come attività collaterale al progetto Apollo [1]. L'importanza strategica della Luna è basata sulla sincronia tra moto di rotazione e rivoluzione della Luna, secondo cui una faccia della Luna (*far-side*) non risulta mai rivolta verso la Terra, ovvero non è

Questo studio denominato "*MicroMoon*: Studio di Telerilevamento della Luna e dalla Luna con microonde" rientra nell'ambito del progetto *Italian Vision for Moon Exploration*, finanziato dall'Agenzia Spaziale Italiana (contratto ASI n. I/043/06/0).

A.Renga, ha lavorato presso il CO.RI.S.T.A. Consorzio di Ricerca su Sistemi di Telesensori Avanzati, viale J.F. Kennedy 5, 80125 Napoli. Ora svolge un dottorato di ricerca presso il D.I.A.S. Dipartimento di Ingegneria Aerospaziale dell'Università di Napoli "Federico II", piazzale Tecchio 80, 80125 Napoli (tel. 081 7652159; fax: 081 7652160; e-mail: [alf.renga@fastwebnet.it](mailto:alf.renga@fastwebnet.it)).

soggetta all'intenso inquinamento radio da essa generato. Inoltre la mancanza di atmosfera e ionosfera consente di aggirare i limiti dell'osservazione terrestre.

## II. LA PIATTAFORMA LUNA

### A. Radioastronomia dalla Luna: vantaggi e svantaggi.

La Luna possiede alcune peculiarità ideali come sito per la radioastronomia, tra cui le principali sono [1], [2], [3]:

*Vuoto spinto*, accessibile a tutte le lunghezze d'onda;

*Cielo stabile, scuro e freddo*;

*Piattaforma stabile*, cioè sulla superficie lunare si possono dispiegare *array* in configurazione stabile su aree molto vaste, laddove invece per satelliti in orbita la gravità rende inevitabili variazioni relative di *baseline*;

*Lenta rotazione*, ovvero accessibilità all'intero cielo osservabile, oltre a facilitata sintesi di apertura per gli interferometri e in generale possibilità di lunghi tempi di integrazione;

*Far-side lunare*, schermato da interferenze di origine terrestre, ed inoltre libero da disturbi atmosferici e ionosferici. Il *far-side* lunare rappresenta la più pulita finestra di osservazione radio dell'universo all'interno dell'intero sistema solare;

*Bassa gravità*, che consente la progettazione di strutture grandi e leggere e riduce la necessità di sistemi di supporto. Inoltre la presenza comunque di gravità consente di collocare strumenti direttamente sulla superficie una volta resa libera dalle polveri;

*Topografia*, l'interno dei crateri può essere sfruttato per la realizzazione di grosse aree riceventi;

*Materie prime*, potenzialmente sfruttabili (materiali da costruzione, acqua, combustibile per generatori nucleari di potenza);

*Vicinanza con la Terra*, relativamente semplice accesso per il *servicing* del telescopio ed il trasporto di infrastrutture.

Parallelamente vanno però sottolineati gli svantaggi di un osservatorio radioastronomico lunare [1], [2], [3]:

*Costi*, decisamente alti (nel 1996 [2] sono stati stimati circa  $10^5$  \$/kg). Il fattore costi costringe quindi a sviluppare strutture semplici e a basso peso;

*Satelliti per telecomunicazioni*, possono distruggere la pulizia radio del *far-side* lunare;

*Vuoto*, rende difficili tutte le operazioni in cui la presenza dell'uomo è necessaria;

*Crateri perennemente in ombra*, siti privilegiati di indagine scientifica, possono divenire ambiente molto ostile per astronauti e strumentazioni;

*Polveri e detriti*, che a causa di fenomeni elettrostatici, possono avere effetti negativi su tutti gli strumenti, sia elettronici che meccanici;

*Raggi cosmici*, hanno una entità decisamente superiore rispetto alla superficie terrestre e a satelliti LEO, e ciò potrebbe essere un rischio per sia per un equipaggio umano che per i dispositivi elettronici.

### B. Applicazioni scientifiche

Osservazioni radioastronomiche dal *far-side* lunare dovrebbero consentire di riempire i vuoti di copertura dello spettro elettromagnetico da parte di analoghi sistemi *Earth-based*, o orbitanti. Due sono i *range* di frequenza di interesse: le bassissime frequenze (3-30 MHz) e la finestra di lunghezze d'onda millimetriche e submillimetriche (10-1000GHz). Nel primo caso le applicazioni sono legate alla mancanza di dati significativi in questa finestra, per cui nuovi fenomeni ed oggetti mai osservati a frequenze superiori potrebbero essere individuati [3]. Inoltre sarebbe possibile lo studio della formazione ed evoluzione delle galassie, la caratterizzazione del mezzo interstellare, l'investigazione legata ai raggi cosmici, la prima rilevazione di filamenti cosmologici a larga scala e di amplificazioni di campo magnetico in strutture a larga scala, la classificazione delle popolazioni di radiosorgenti in questo spettro di frequenza, la rilevazione delle emissioni radio legate all'annichilimento della materia oscura [4]. Per il *range* di frequenze da 10 a 1000 GHz, tre grossi sottotemi possono essere individuati [4]: la rilevazione di molecole d'acqua in siti astronomici lontani per mezzo dell'osservazione della radiazione amplificata da MASER (Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation); la rilevazione di molecole di ossigeno e la misurazione della loro abbondanza (impossibile dalla superficie terrestre a causa della presenza dell'atmosfera); lo studio della polarizzazione della radiazione cosmica di fondo CMBP (Cosmic Microwave Background Polarization), facilitato dalla elevata stabilità dell'ambiente lunare.

### C. Localizzazione del sito migliore

Nel *far-side* lunare il sito migliore va scelto tentando di minimizzare il livello di interferenza di origine terrestre. Partendo da questa considerazione si può dire che una prima condizione da rispettare è che il sito si trovi abbastanza oltre il terminatore lunare (meridiano con longitudine selenografia di 90°) in modo da assicurare le condizioni di basso rumore. L'osservatorio potrebbe essere posto in un cratere offrendo un ulteriore schermo ma con lo svantaggio di ridotte capacità di osservazione alle basse elevazioni. Accanto ad inquinamento di origine terrestre, va considerato anche quello generato da satelliti per telecomunicazione collocati in orbita terrestre. Secondo il modello geometrico elaborato da Maccone [5],

il settore lunare compreso tra le longitudini 154.359° E e 154.359° W non potrà mai essere contaminato da interferenze radio generate da satelliti Earth-orbiting. A partire da questa analisi Maccone propone l'utilizzo del cratere Daedalus (5.9°S/179.4°E).

Le considerazioni di Maccone prevedono che satelliti per telecomunicazione saranno installati anche su orbite molto più elevate rispetto alle attuali GEO. Realisticamente è possibile ritenere che il limite di longitudini imposto da Maccone possa essere rilassato, consentendo di sfruttare altri e più ampi crateri del *far-side* lunare (Tsiolkovsky, Saha...).

## III. RADIOASTRONOMIA A BASSISSIMA FREQUENZA

### A. Beam scanning vs aperture synthesis

Nella radioastronomia alle bassissime frequenze (<30MHz) vengono impiegati *array* costituiti da tanti singoli elementi a basso guadagno [6]. Le due principali modalità operative per un *array* di antenne sono il *beam scanning in real time* usando un *phased array*, oppure l'*array-synthesis* registrando i dati raccolti dai singoli elementi e sottoponendoli ad un opportuno processamento.

Per poter scegliere tra le due modalità occorre tenere conto dei relativi impatti sul progetto dell'*array*. La tecnica *array synthesis* impone meno vincoli sul posizionamento dei singoli elementi in quanto questi possono essere collocati anche in maniera casuale. La riduzione dei lobi laterali avviene inseguendo a lungo una data sorgente e quindi incrementando la copertura nel piano u-v: per questo motivo servono pochi elementi e la spaziatura non è critica. Il solo requisito è la possibilità di collegamento stabile tra ogni elemento ed una stazione centrale. Viceversa per creare un *beam in real time* e riorientarlo è necessario un *array* di antenne densamente e uniformemente spaziate (la densità è misurata rispetto alla lunghezza d'onda). Inoltre le interconnessioni tra gruppi e sottogruppi di antenna sono assolutamente necessarie per l'osservazione *phased array*. Il solo grosso vantaggio del *phased array* risiede nella possibilità di fissare il livello dei lobi laterali in fase di progetto. Indipendentemente dal tipo di modalità è necessaria comunque una stazione centrale per il controllo dell'*array*. Nel caso *phased array* l'unità centrale sarebbe impegnata nell'inviare segnali ai vari elementi durante tutta l'osservazione, con in uscita un unico segnale di *output* dell'*array*. Al contrario nel caso di *array synthesis* i segnali in uscita sarebbero moltiplicati e la fase di *imaging* molto più complessa.

Tenendo conto dei limiti di mobilità e dislocazione sulla superficie lunare, la soluzione migliore, almeno in una prima fase, appare quella di un *cluster* di antenne che operi in modalità *array synthesis* in modo che pochi elementi siano necessari; gli elementi potrebbero dispiegati sul suolo lunare con strategie diverse (per mezzo di impattatori, per mezzo di rover a valle di un allunaggio morbido, o per mezzo di astronauti) e la loro localizzazione dovrebbe essere nota solo

approssimativamente, anche a valle dell'effettivo dispiegamento.

### B. Singola unità dipolo

In un ambiente come quello lunare è auspicabile considerare elementi antenna che non richiedano movimentazioni meccaniche e con tutti i puntamenti eseguiti elettronicamente. Il più semplice tipo di antenna è il dipolo [7], la cui lunghezza può essere una frazione apprezzabile della lunghezza d'onda (*long dipole*), o essere molto più piccola di una lunghezza d'onda (*short o incremental dipole*).

Il vantaggio dei dipoli lunghi è la loro direttività che si traduce nella capacità di escludere, almeno parzialmente, segnali provenienti da direzioni indesiderate. Nel caso lunare il modo più semplice per operare è supporre una antenna di dimensione fissa e dunque subire la variabilità del *pattern* con la lunghezza d'onda. Nel caso di dipoli lunghi questo significa in primo luogo avere bisogno di due dipoli per unità per coprire ogni direzione del cielo, in secondo luogo subire grosse e complicate variazioni di *pattern* con la lunghezza d'onda. Queste complicazioni possono essere evitate utilizzando dipoli che siano incrementali in tutto il *range* delle frequenze operative [1]. Ad esempio fissato la lunghezza d'onda ad un decimo di quella relativa alla massima frequenza (30 MHz), il relativo *pattern* è molto simile ad una nocciolina americana. Inoltre al diminuire della frequenza il *pattern* si allarga sempre più non modificando significativamente la sua forma.

Il grande vantaggio dell'utilizzo dei dipoli incrementali consiste nella semplicità con cui è possibile inseguire le sorgenti osservate senza movimenti fisici, anche se non è del tutto possibile evitare di ricevere segnali provenienti da direzioni indesiderate. La discriminazione tra le sorgenti sarà possibile solo in fase di correlazione tra i segnali dei singoli dipoli.

### C. Esempio di copertura del piano u-v

Un interferometro a rotazione può essere realizzato sfruttando il lento moto di rotazione della Luna. È noto che  $N$  elementi costituenti un interferometro generano  $N(N-1)/2$  *baseline* [8]. Se il numero di *baseline* è abbastanza elevato non è necessario osservare continuamente una data sorgente, ma un opportuno numero di acquisizioni a breve durata temporale, ben spaziate nel tempo, sono sufficienti ad ottenere un buon campionamento sul piano u-v. La tecnica è nota come *snapshot* ed è particolarmente utile per l'applicazione lunare. Infatti da un lato il giorno lunare è circa 28 volte più lungo di quello terrestre, dall'altro si stima che il tempo di integrazione superato il quale le misurazioni non cambiano più sensibilmente, è raggiunto sulla Luna in circa 30-40 secondi.

Con un tempo di integrazione così ridotto l'unica soluzione attuabile è realizzare uno *snapshot* poi attendere la rotazione della Luna e realizzare il successivo.

Accompagnando lo *snapshot* all'*array synthesis* si può ottenere una drastica riduzione delle necessità di memorizzazione dati sulla Luna eseguendo direttamente sulla stazione centrale le dovute correlazioni.

Al fine di quantificare queste osservazioni è stata eseguita una simulazione ipotizzando un *array* di 30 antenne disposte in maniera random a circa  $20^\circ$  di latitudine sud (la stessa del cratere Tsiolkovsky), su un'area di 50 km operante ad una lunghezza d'onda di 15 m. L'*array* osserva una sorgente caratterizzata da una declinazione di  $60^\circ$  S. La stessa sorgente è osservata nella modalità *snapshot* per un periodo di tempo pari a circa 1 angolo orario lunare (1.2 giorni terrestri). La figura 1 riporta la relativa copertura del piano u-v. La risoluzione angolare stimata è di circa mezzo arco minuto.

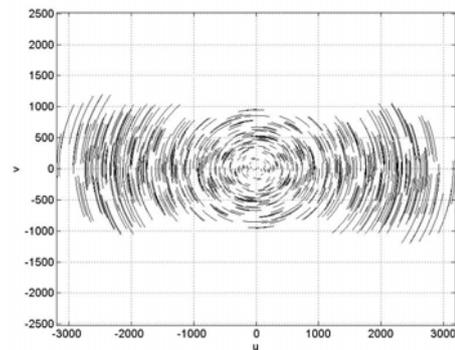


Fig. 1 Copertura del piano u-v risultante dalla disposizione casuale dell'array (le componenti del piano sono espresse in multipli di lunghezza d'onda)

## IV. RADIOASTRONOMIA AD ONDA MILLIMETRICA E SUBMILLIMETRICA

Per l'osservazione radioastronomica nel *range* di frequenze che va da 10 a 1000 GHz sono necessari grossi riflettori parabolici [9]. Il valore minimo di risoluzione necessario per ottenere significativi risultati scientifici è dell'ordine dell'arco minuto. Questo significa che a 10 GHz è necessario un riflettore con un diametro dell'ordine dei 100 m. Valori più piccoli (4-10 m) sono possibili se tale valore di risoluzione può essere limitato alle sole alte frequenze ( $> 100$  GHz).

### A. Riflettori ad alta precisione

Un problema connesso con la realizzazione di grossi riflettori per applicazioni radioastronomiche ad onda millimetrica è quello della elevatissima precisione superficiale necessaria. Quando le lunghezze d'onda diventano molto piccole le irregolarità nella superficie riflettente possono causare perdita di coerenza ovvero riduzione di area effettiva. Le prestazioni ottenibili sono in genere misurate dal rapporto  $r$  tra il diametro del riflettore  $D$  e l'errore superficiale rms  $\sigma$  [10]. Il telescopio ad onda millimetrica lunare dovrà essere in grado di raggiungere valori di  $r$  superiori al milione il che significa errori superficiali inferiori ai 100  $\mu\text{m}$ .

In termini di ottica, l'utilizzo di un fuoco secondario,

Nasmyth, Gregoriano o Cassegrain, è la soluzione migliore per diversi motivi. In primo luogo il fuoco secondario è situato dietro il riflettore principale consentendo di montare grossi ricevitori opportunamente raffreddati (assolutamente necessari per le applicazioni ad alta sensibilità). Inoltre ricevitori diversi adattati alle relative bande di frequenza possono essere montati nell'area antistante il riflettore principale. In uno scenario lunare in cui si vogliono sfruttare cavità naturali, la camera in cui andrebbero sistemati i ricevitori si troverebbe al di sotto della superficie lunare e ad una temperatura praticamente costante.

### B. Ricevitori

I segnali rilevati nella radioastronomia ad onda millimetrica e submillimetrica sono estremamente deboli, tipicamente molto inferiori al rumore interno del ricevitore e di conseguenza l'estrazione del segnale desiderato può richiedere diverse ore di integrazione [9], [10].

La sensibilità delle osservazioni sia *spectral line* che *continuum* è governata dalla equazione radiometrica classica [10], ovvero inversamente proporzionale alla ampiezza di banda e al tempo di integrazione. I ricevitori utilizzati nel *range* di frequenze in esame possono essere raggruppati in due categorie [10]: ricevitori incoerenti (bolometri) che utilizzano tecniche mutuata dall'infrarosso e ricevitori eterodini o coerenti (radiometri). Entrambi possono essere utilizzati sia in osservazioni *spectral line* che *continuum*. Per coprire completamente (in termini di accuratezza e stabilità) il range di frequenze comprese tra i 10 e i 1000 GHz, l'osservatorio *Moon-based* dovrà essere equipaggiato con un set di 3 tipi diversi di ricevitori: un *bolometro*, raffreddato attivamente fino a circa 0.1 K andrebbe impiegato per osservazione *continuum* tra 100 e 1000 GHz; un *radiometro*, raffreddato fino a circa 20 K ed equipaggiato con tecnologia HEMT (High Electron Mobility Transistor), andrebbe impiegato per osservazioni *continuum* tra 10 e 100 GHz; un radio spettrometro, raffreddato fino a circa 10 K, sarà impiegato per le osservazioni *spectral line*. Le diverse temperature operative costringeranno a progettare soluzioni innovative per quel che riguarda la stabilizzazione termica dei vari ricevitori, che comunque dovranno operare sullo stesso piano focale e dunque non potranno essere tenuti troppo lontani gli uni dagli altri. I valori molto bassi di temperature operative potrebbero suggerire come sito ideale il fondo di un cratere lunare perennemente in ombra. Tuttavia per non limitare le caratteristiche di copertura regioni equatoriali andrebbero selezionate. Da qui l'importanza di ospitare i ricevitori dietro il riflettore in una camera situata al di sotto della superficie lunare.

## V. CONCLUSIONI

Sono state analizzate possibili soluzioni per l'installazione sul *far-side* lunare di stazioni per l'osservazione dell'universo nel *range* delle bassissime frequenze (3-30 MHz) e in quello delle lunghezze d'onda

millimetriche e sub-millimetriche (10-1000 GHz). In ambo i casi si tratta di osservazioni difficilmente realizzabili sia da stazioni *Earth-based* che da piattaforme orbitanti.

Per le bassissime frequenze viene proposta la realizzazione di un *array* interferometrico costituito da circa 30 dipoli da dislocare su un'area di circa 50 km, mentre per l'indagine ad onda millimetrica sono necessari grossi riflettori (10-100 m di diametro) ed un set di almeno tre tipi diversi di ricevitori.

La realizzazione di un'osservazione *far-side* presuppone la risoluzione di una serie di problemi tecnici: dispiegamento delle antenne in ambiente ricco di detriti e/o crateri; prestazioni da garantire in condizioni di vuoto spinto; mantenimento della giusta calibrazione in un ambiente caratterizzato da forti escursioni termiche; strategie per la sopravvivenza (umana ed elettronica) in un ambiente esposto a raggi cosmici e galattici; capacità di resistenza a impatti micrometeoritici.

Molte di queste problematiche dovranno essere affrontate in una fase dell'esplorazione lunare sicuramente precedente all'installazione sul *far-side* lunare di infrastrutture per applicazioni radioastronomiche. Di conseguenza, anche se il livello di maturità tecnologica dei singoli sottosistemi proposti ed analizzati è piuttosto alto (sottocomponenti hanno volato con successi in precedenti missioni *spaceborne*) è ragionevole collocare i due sistemi ad un valore di TRL compreso tra 4-5, e quindi una effettiva realizzazione non prima del 2020.

## RINGRAZIAMENTI

Gli autori ringraziano l'ing. Sergio Losito del Centro di Geodesia Spaziale dell'Agenzia Spaziale Italiana di Matera, ed il dott. Gianfranco Brunetti dell'Istituto di Radioastronomia del Consiglio Nazionale delle Ricerche di Bologna, per i preziosi suggerimenti ricevuti durante lo svolgimento dello studio.

## RIFERIMENTI

- [1] Burns, J.O., N. Duric, S. Johnson et al., 'A Lunar Far-Side Very Low Frequency Array' NASA Conference Publication 3039, 1989
- [2] B. H. Foing, 'The Moon as a platform for astronomy and space science', Adv. Space Res. Vol. 18, No. 11, pp. 17-23, 1996
- [3] Y. D. Takahashi, 'Radio Astronomy from Lunar Far Side: Precursor Study of Radio Wave Propagation around the Moon', Astron. & Astroph. Group, University of Glasgow, January 2002.
- [4] L. Colangeli, 'Definition of scientific requirements', Contract ASI/AAS n. I/043/06/0
- [5] C. Maccone, "Lunar Farside Radio Lab", SETI Permanent Study Group of the IAA, November 2001
- [6] S. W. Ellingson, 'Antennas for the Next Generation of Low-Frequency Radio Telescopes', IEEE trans. On Antennas and Propagation, Vol. 53, No. 8, August 2005
- [7] R. E. Collin, 'Antennas and Radiowave propagation', McGraw-Hill Book Company 1995, p. 199-215
- [8] E. B. Fomalont, 'Earth-Rotation Aperture Synthesis', Proc. Of the IEEE, Vol. 61, No. 9, September 1973.
- [9] J.Archer, 'Low-Noise Heterodyne Receivers for Near-Millimeter-Wave Radio Astronomy', Proc. IEEE, Vol. 73. No 1 January 1985
- [10] J. M. Payne, 'Millimeter and Submillimeter Wavelength Radio Astronomy', Proc. Of the IEEE, Vol. 77, No. 7, July 1989.