

Francesco Giarrusso

Introduzione alla Very Long Base Interferometry (VLBI)¹

La tecnica della Very Long Baseline Interferometry (VLBI)² si basa su principi fondamentali dell'osservazione radioastronomica. I radiotelescopi VLBI, come tutti i telescopi (radio, ottici, a raggi X), servono per accoppiare la radiazione elettromagnetica proveniente da sorgenti cosmiche con i dispositivi di misurazione. Questi telescopi raccolgono la radiazione elettromagnetica in arrivo, la quale può essere trattata come una sovrapposizione di onde elettromagnetiche. In contrasto con l'astronomia ottica o a raggi X, per le quali la radiazione arriva sotto forma di quanti discreti di energia (fotoni), in radioastronomia è possibile utilizzare amplificatori a basso rumore prima delle rilevazioni, permettendo un'elaborazione più accurata del segnale.

In radioastronomia, l'osservazione inizia quando le onde elettromagnetiche vengono catturate dal radiotelescopio. Un elemento centrale nella VLBI è l'antenna, la quale raccoglie il campo di radiazione in entrata e lo conduce ai terminali di uscita sotto forma di segnali elettrici. La dimensione dell'apertura dell'antenna determina l'angolo solido³ del fascio di radiazioni e, di conseguenza, il flusso di potenza massima al centro del fascio⁴. Queste onde sono poi convertite in segnali elettrici, che possono essere successivamente amplificati, trasferiti su diverse bande di frequenza e combinati con altri segnali a radiofrequenza.

La caratteristica distintiva dell'interferometria a lunghissima linea di base risiede nella interconnessione e sincronizzazione di radiotelescopi dislocati in diversi punti sulla super-

1 Per una introduzione alla radioastronomia e in particolare alla VLBI, si veda B.F. Burke, F. Graham-Smith, P.N. Wilkinson, *An Introduction to Radio Astronomy*, Cambridge University Press, Cambridge 2019.

2 La Very Long Baseline Interferometry è una tecnica di osservazione che sfrutta l'utilizzo di radiotelescopi distanti tra loro anche migliaia di chilometri. Questi radiotelescopi, operando in maniera coordinata, possono ottenere immagini di sorgenti celesti con una risoluzione angolare estremamente elevata, equivalente a quella di un ipotetico radiotelescopio con un diametro pari alla massima distanza tra le antenne coinvolte. La VLBI è particolarmente utile per studiare dettagli fini di sorgenti radioastronomiche come nuclei galattici attivi, quasar e buchi neri.

3 L'angolo solido del fascio di radiazioni rappresenta l'area del cono di radiazione emesso da un'antenna o un radiotelescopio, misurata sulla superficie sferica che circonda la sorgente. Esprime la direzione e l'estensione dello spazio in cui il segnale è significativamente irradiato o ricevuto. Maggiore è la precisione con cui l'antenna può dirigere o ricevere il segnale, minore sarà l'angolo solido del fascio, consentendo una maggiore direttività e capacità di discriminare sorgenti vicine nel cielo.

4 Il flusso di potenza massima al centro del fascio si riferisce all'intensità massima del segnale che un'antenna o un radiotelescopio può rilevare o emettere, concentrata nel centro del fascio di radiazione. Questa misura è cruciale per valutare la capacità dell'antenna di concentrare l'energia in una direzione precisa, aumentando la sensibilità in relazione a sorgenti celesti deboli e migliorando la qualità delle immagini radioastronomiche.

ficie terrestre. Tale array di sorgenti di rilevazione può essere costituito da radiotelescopi paraboloidali⁵ distribuiti geograficamente, ognuno dei quali osserva una porzione di cielo, definita dal proprio campo visivo (FOV), raccogliendo una pluralità di “vedute”, analoghe ai tasselli di un mosaico complesso che verrà successivamente ricomposto.

Per quanto riguarda la larghezza di banda, è importante notare che l’ampiezza del lobo principale di un radiotelescopio è proporzionale al rapporto λ/D , dove λ è la lunghezza d’onda e D è il diametro dell’apertura dell’antenna. Questo rapporto determina la risoluzione angolare⁶ delle osservazioni, ovvero quanto dettagliate saranno le rilevazioni di oggetti astronomici distanti e dalle dimensioni minute.

La spaziatura tra gli elementi dell’array può essere regolata per affinare il fascio di radiazione e migliorare la risoluzione. La distanza tra coppie di radiotelescopi è detta linea di base e indica quanto distanti sono tra loro gli strumenti di rilevazione. Una maggiore lunghezza delle linee di base consente una risoluzione angolare più elevata, permettendo di catturare dettagli più precisi degli oggetti astronomici.

A questo proposito, però, è rilevante sottolineare le limitazioni fisiche delle configurazioni interferometriche terrestri, in particolare per quanto riguarda le dimensioni delle linee di base. Nella tecnica VLBI terrestre, la massima estensione delle linee di base è, per ovvie ragioni fisico-geografiche, limitata al diametro terrestre, dal momento che i radiotelescopi sono installati sulla superficie del pianeta. Questo limite intrinseco impone una soglia massima alla risoluzione angolare raggiungibile dall’interferometria terrestre.

D’altro canto, l’interferometria spaziale, come nel caso del progetto VSOP-HALCA, supera questa limitazione geografica. Utilizzando un radiotelescopio orbitante nello spazio, le linee di base interferometriche possono estendersi ben oltre il diametro terrestre. Questa lunghezza maggiore delle linee di base consente una risoluzione angolare più elevata, superando i limiti imposti dalle configurazioni terrestri. La distanza tra due radiotelescopi in un sistema interferometrico spaziale può, infatti, eccedere significativamente il diametro del nostro pianeta, offrendo una visione più dettagliata degli oggetti astronomici osservati.

Questo schema esemplificativo illustra il funzionamento della Very Long Baseline Interferometry (VLBI). Viene messo in evidenza l’arrivo sfasato dei segnali radio ai radiotelescopi terrestri da una sorgente cosmica, un aspetto fondamentale che necessita di correzione attraverso tecniche precise di sincronizzazione. Gli orologi maser ad alta precisione, unitamente ai correlatori, sono essenziali per compensare il ritardo temporale tra i vari segnali ricevuti, consentendo agli astronomi di combinare le informazioni in modo accurato per ottenere immagini radio con una risoluzione senza precedenti.

⁵ In radioastronomia ad alte frequenze, dove l’uso di riflettori di grandi dimensioni non è pratico, vengono impiegati array piatti di elementi di dipolo distribuiti sul terreno. Questi array possono coprire un’area più ampia rispetto a un singolo riflettore orientabile, consentendo osservazioni più estese e dettagliate del cielo.

⁶ La risoluzione angolare è la capacità di un telescopio di distinguere piccoli dettagli di un oggetto astronomico, misurando essenzialmente il più piccolo angolo tra due punti che possono ancora essere separati. Nella VLBI una maggiore risoluzione angolare si ottiene aumentando la base, o la distanza tra i telescopi, permettendo osservazioni più dettagliate di oggetti cosmici distanti.

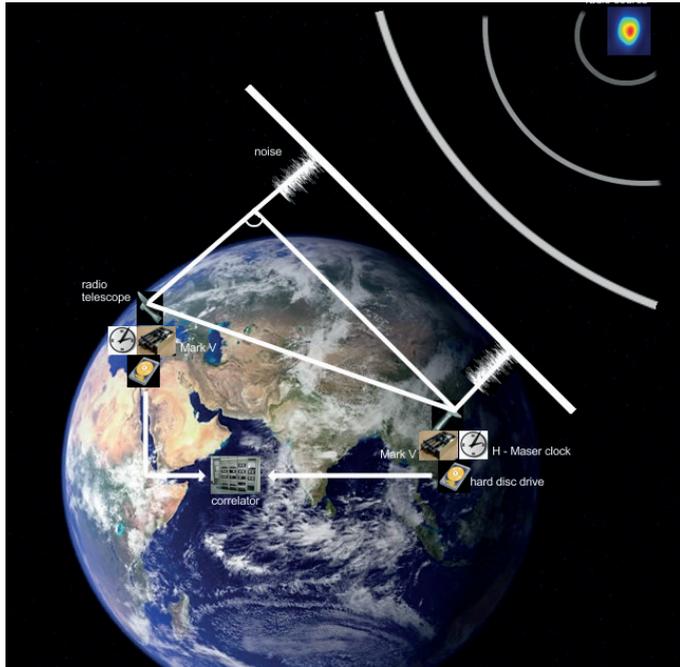


Fig. 1. Questo schema esemplificativo illustra il funzionamento della Very Long Baseline Interferometry (VLBI). Viene messo in evidenza l'arrivo sfasato dei segnali radio ai radiotelescopi terrestri da una sorgente cosmica, un aspetto fondamentale che necessita di correzione attraverso tecniche precise di sincronizzazione. Gli orologi maser ad alta precisione, unitamente ai correlatori, sono essenziali per compensare il ritardo temporale tra i vari segnali ricevuti, consentendo agli astronomi di combinare le informazioni in modo accurato per ottenere immagini radio con una risoluzione senza precedenti. Credits: GFZ Helmholtz-Zentrum Potsdam

Breve presentazione del progetto VSOP-HALCA⁷

Il VLBI Space Observatory Program (VSOP), concepito alla fine degli anni Ottanta del secolo scorso presso l'Institute of Space and Astronautical Science in Giappone, è emerso sulla scia del successo dell'esperimento dimostrativo VLBI TDRSS. La missione VSOP-HALCA, coordinata dal VSOP International Science Council, includeva la gestione di cinque stazioni di rilevamento e acquisizione dati rispettivamente in Australia, Giappone, Spagna e due negli

⁷ Per maggiori approfondimenti sulla missione VSOP-HALCA, si consiglia la lettura di B.F. Burke, *Orbiting VLBI: A Survey*, in R. Fanti, K. Kellermann, G. Setti (a cura di), *VLBI and Compact Radio Sources. Symposium no. 110 Held in Bologna, Italy, June 27-July 1, 1983*, 1984; L.I. Gurvits, *Radio Interferometers Larger than Earth: Lessons Learned and Forward Look of Space VLBI*, "Proceedings of the 69th International Astronautical Congress", 2018; Id., *Space VLBI: From First Ideas to Operational Missions*, "Advances in Space Research", 2, 2020; Id., *The Brief History of Spatial VLBI*, "Proceedings of the IEEE 'History of Electrotechnology Conference', 2023; H. Hirabayashi et al., *Overview and Initial Results of the Very Long Baseline Interferometry Space Observatory Programme*, "Science", 281, 1998; H. Hirabayashi et al., *The VSOP 5 GHz AGN Survey I. Compilation and Observations*, "Astronomical Society of Japan", 52, 2000; H. Hirabayashi et al., *The VLBI Space Observatory Programme and the Radio-Astronomical Satellite HALCA*, "Astronomical Society of Japan", 52, 2000; G.S. Levy et al., *Very Long Baseline Interferometric Observations Made with an Orbiting Radio Telescope*, "Science", 4773, 1986; J.E.J. Lovell et al., *The VSOP 5 GHz Active Galactic Nucleus Survey. II. Data Calibration and Imaging*, "The Astrophysical Journal", 155, 2004.

Stati Uniti e tre strutture di elaborazione dati (correlatori) situate presso il Dominion Radio Astrophysical Observatory in Canada, il National Astronomical Observatory of Japan e il National Radio Astronomy Observatory negli USA.

Sebbene il progetto fosse inizialmente finalizzato a testare il nuovo razzo a combustibile solido a quattro stadi M-V e la piattaforma satellitare HALCA (Highly Advanced Laboratory for Communication and Astronomy), dopo il lancio del 12 febbraio 1997, il progetto ha assunto un ruolo scientifico significativo per quanto concerne gli esperimenti di Space Very Long Baseline Interferometry (SVLBI)⁸, il cui programma scientifico includeva l'osservazione di sorgenti radio extragalattiche come quasar, radiogalassie e oggetti BL Lacertae, oltre a maser idrossilici e pulsar a 16 GHz⁹. Il focus primario era determinare il meccanismo di emissione delle sorgenti di continuum, in particolare quelle associate ai nuclei galattici attivi (AGN)¹⁰ alimentati da buchi neri supermassicci.

Il componente principale della missione è stato un radiotelescopio spaziale con un riflettore parabolico di 8 metri di diametro effettivo. La superficie del riflettore era formata da una rete metallica di molibdeno rivestita d'oro. Il satellite disponeva di tre ricevitori che permettevano osservazioni a 18, 6 e 1,3 cm in polarizzazione circolare sinistra (LCP)¹¹, e si trovava su un'orbita di media eccentricità con un apogeo di circa 22.000 km sopra la Terra e un periodo orbitale di circa 6 ore.

Per quanto riguarda le operazioni, VSOP operava con una velocità di trasmissione dati aggregata di 128 Mbit/s, la più alta velocità all'epoca di downlink dati sostenibile per una missione scientifica spaziale. La coerenza del segnale era supportata da un anello ad aggancio di fase (PLL) alimentato da uno standard di frequenza del maser a idrogeno in una stazione di rilevamento¹². Due delle tre bande di osservazione (18 e 6 cm) hanno funzionato con

8 La Space Very Long Baseline Interferometry estende la tecnica VLBI oltre i limiti fisici della Terra utilizzando radiotelescopi nello spazio. Questo permette basi interferometriche più lunghe, migliorando notevolmente la risoluzione angolare e consentendo osservazioni più dettagliate di sorgenti radio astronomiche.

9 I quasar sono nuclei galattici attivi estremamente luminosi, alimentati da buchi neri supermassicci al centro di galassie distanti. Emettono energia in un vasto spettro di frequenze, dalla radio alla luce visibile, fino ai raggi X e possono superare in luminosità l'intera galassia ospite.

Le radiogalassie sono galassie che emettono forti radiazioni radio. Questa emissione è generalmente prodotta da processi relativistici che avvengono nei loro nuclei attivi o in getti di particelle ad alta energia espulsi dal centro galattico.

Gli oggetti BL Lacertae sono una classe di AGN (Active Galactic Nuclei) caratterizzati dalla loro variabilità estrema e polarizzazione ottica. La loro emissione è dominata da processi non termici, probabilmente dovuti a getti relativistici di materia che puntano quasi direttamente verso l'osservatore.

I maser idrossilici si verificano quando molecole di idrossile (OH) in nubi spaziali amplificano la luce a lunghezze d'onda specifiche, creando un effetto maser (microonde). Sono spesso associati a regioni di formazione stellare e possono fornire importanti informazioni sulle condizioni fisiche delle nubi molecolari.

Le pulsar sono stelle di neutroni rotanti che emettono getti di radiazioni elettromagnetiche dai loro poli magnetici. Quando questi getti incrociano la linea di vista della Terra, appaiono come impulsi periodici di radiazione.

10 I nuclei galattici attivi (AGN) sono regioni centrali luminose di alcune galassie, alimentate da buchi neri supermassicci. Mentre la materia cade nel buco nero, parte di essa viene convertita in energia radiante visibile su un ampio spettro di frequenze, rendendo gli AGN tra gli oggetti più luminosi dell'universo.

11 La polarizzazione circolare sinistra (LCP) descrive un'onda elettromagnetica la cui direzione del campo elettrico ruota in senso antiorario (visto dall'osservatore), mantenendo la sua ampiezza costante. Questo tipo di polarizzazione è importante in radioastronomia per analizzare le proprietà magnetiche e fisiche delle sorgenti celesti.

12 In contesti radioastronomici, i PLL sono cruciali per mantenere la precisione del segnale e la sincronizzazione tra diversi componenti di un sistema di rilevamento. Quando alimentato da uno standard di frequenza basato su un

successo, mentre la terza banda (a più alta frequenza di 1,35 cm) presentava un rumore di sistema molto elevato, presumibilmente a causa di danni subiti durante il lancio del satellite.

Il programma scientifico VSOP-HALCA includeva un importante survey VLBI del continuum di nuclei galattici attivi, occupando circa il 25% del tempo operativo della missione. Circa il 50% del tempo operativo era aperto a proposte sottoposte a peer review dalla comunità scientifica mondiale, con il restante 25% dedicato a test e altre operazioni di ingegneria.

In conclusione, la missione VSOP-HALCA ha fornito una quantità significativa di dati osservativi su sorgenti radio galattiche ed extragalattiche a una scala angolare submilliarocsecondo¹³ precedentemente inesplorata, attraverso osservazioni del continuum a 18 e 6 cm di lunghezza d'onda e della linea spettrale dell'idrossile a 18 cm¹⁴.

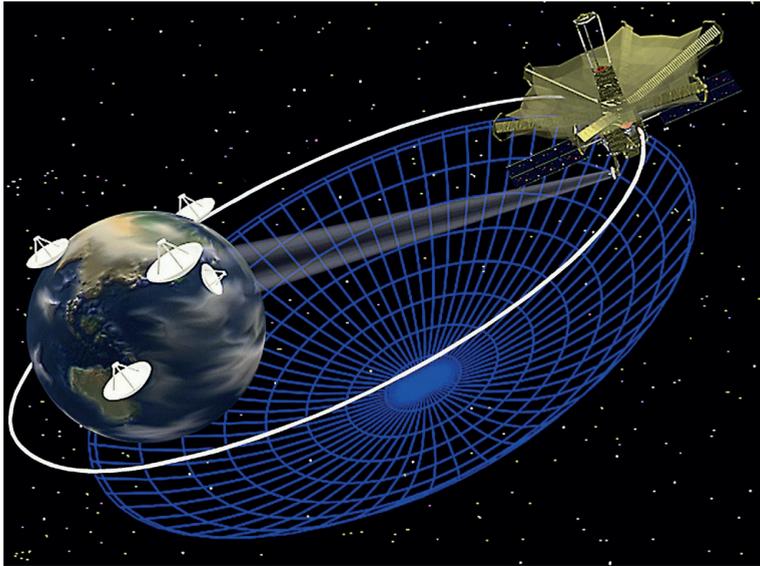


Fig. 2. L'immagine rappresenta il satellite HALCA del progetto VSOP che, insieme ai radiotelescopi terrestri, forma una configurazione di interferometria a lunghissima base (VLBI) spaziale. La parabola blu visualizza la "baseline virtuale", ovvero la distanza tra i radiotelescopi e il satellite, che consente di realizzare osservazioni ad altissima risoluzione. Credits: Jet Propulsion Laboratory California Institute of Technology

maser a idrogeno, il PLL beneficia di una fonte di segnale estremamente stabile e precisa. I maser a idrogeno sono tra gli standard di frequenza più accurati, utilizzati nelle stazioni di rilevamento per garantire che le misurazioni siano coerenti e affidabili nel tempo. Questa configurazione è essenziale per le osservazioni radioastronomiche di alta precisione, permettendo agli astronomi di eseguire misurazioni dettagliate delle sorgenti radio celesti.

13 La scala angolare submilliarocsecondo si riferisce alla capacità di misurare angoli estremamente piccoli nel cielo, un'unità di misura critica in radioastronomia per determinare la dimensione apparente o la separazione tra oggetti celesti distanti con precisione eccezionale. Questa scala è fondamentale per le osservazioni VLBI (Very Long Baseline Interferometry), permettendo agli astronomi di ottenere dettagli ad altissima risoluzione di sorgenti radio come quasar e nuclei galattici attivi.

14 La linea spettrale dell'idrossile a 18 cm corrisponde alle transizioni energetiche della molecola di idrossile (OH) che emettono o assorbono radiazioni nella regione radio dello spettro elettromagnetico. Queste transizioni sono di particolare interesse in astrofisica perché segnalano la presenza di molecole in condizioni specifiche di temperatura e densità, fornendo informazioni essenziali sulla chimica interstellare, la formazione stellare e le condizioni fisiche delle nubi molecolari.



Fig. 3. In questa fotografia due tecnici stanno eseguendo l'assemblaggio finale o i controlli su HALCA, il satellite centrale del progetto VSOP. La lamina dorata che ricopre il satellite funge da isolante termico, essenziale per mantenere i delicati strumenti a bordo operativi nonostante le estreme variazioni di temperatura nello spazio. Credits: Institute of Space and Astronomical Science - Japan Aerospace Exploration Agency

VSOP-HALCA e la air age

Il progetto VSOP-HALCA, il cui funzionamento si fonda sull'utilizzo di tecniche e tecnologie che sfruttano la sfericità della Terra e l'interazione simultanea tra agenti umani e macchinici, ha contribuito a una ridefinizione dell'idea e dell'esperienza del mondo.

Per cogliere pienamente l'entità di questa trasformazione, riteniamo proficuo esaminare il VSOP-HALCA nel contesto della air age. In questo panorama storico e tecnologico, il progetto emerge come una delle espressioni più significative, portando a pieno compimento le potenzialità insite in questo passaggio epocale.

In linea con le considerazioni di Vegetti¹⁵, il 1942 non segna semplicemente l'inizio, ma piuttosto la piena realizzazione di questa nuova fase storica, testimoniata, tra l'altro, dalla fine dell'espansionismo europeo e dall'ascesa degli Stati Uniti a potenza globale: passaggio di consegna riconducibile in larga misura alle forze atmosferiche degli aerei e delle telecomunicazioni. Questo momento storico, con la battaglia aerea di Midway e il conseguente esordio della guerra elettronica, la cui tecnologia si è dimostrata decisiva per le sorti del secondo conflitto mondiale, pone fine all'antica dicotomia terra-mare a favore di una nuova concezione dello spazio in cui il cielo si trasforma da confine a percorso, da limite a ponte. Le distanze si riducono non più a misurazioni cartesiane ma a traiettorie del trasporto, del messaggio, dell'informazione, delineando una geografia non più ancorata alla rigidità delle carte, ma fluida al pari delle onde elettromagnetiche che percorrono l'atmosfera, preparando il passaggio dal wire al wireless, dall'archetipo delle rotte commerciali marittime all'"etere" dell'aria come medium globale.

Gli anni a cavallo del secondo conflitto mondiale, caratterizzati da radicali mutamenti spaziali e dalla comparsa di nuovi «media intrinsecamente globali come gli aerei, le trasmissioni elettroniche e le onde radio»¹⁶, inaugurarono, quindi, quella che può essere definita come «una seconda rivoluzione spaziale», differente ma non meno rilevante rispetto alla rivoluzione marittima del passato¹⁷. Detto in altro modo, «[l]'aeroplano e la radio hanno prodotto una nuova ecologia umana planetaria», come osservato da G.T. Renner nel 1944¹⁸, anticipando una trasformazione radicale nel nostro rapporto con lo spazio e l'informazione.

In questa nuova era, l'elemento dell'aria non fu più solo un mezzo da attraversare o un luogo da occupare, ma divenne uno spazio attivo, rivelando proprietà specifiche che trovarono applicazioni innovative in ambiti come le telecomunicazioni, l'esplorazione e l'osservazione astronomica.

Questa trasformazione dell'elemento naturale dell'aria in un medium e ambiente attivo è evidente nel progetto VSOP-HALCA. Il sistema di radiotelescopi, distribuiti su scala globale e interconnessi attraverso sofisticate reti di telecomunicazione, rappresenta una concretizzazione di questa nuova configurazione spaziale.

15 M. Vegetti, *L'invenzione del globo. Spazio, potere, comunicazione nell'epoca dell'aria*, Einaudi, Torino 2017, pp. 167-168.

16 M. Vegetti, *L'invenzione del globo. Spazio, potere, comunicazione nell'epoca dell'aria*, cit., p. XII.

17 Carl Schmitt (in *Stato, grande spazio, nomos*, Adelphi, Milano 2015) avanzava l'ipotesi secondo cui il secondo dopoguerra fosse già implicato nella fase iniziale di questa seconda globalizzazione, catalizzata dall'irruzione dell'elemento aereo trasformato in estensione spaziale ad opera di media intrinsecamente globali, che sovvertirono il rapporto dualistico terra-mare, inaugurando una crisi che investì l'ordinamento statale. Parallelamente, Pierre Lévy (in *L'intelligenza collettiva. Per un'antropologia del cyberspazio*, Feltrinelli, Milano 2002) contempla l'erosione della forma-Stato a fronte dell'ascesa dell'intelligenza collettiva favorita dalla società della rete. Tale fenomeno, che Lévy descrive come una nuova configurazione transnazionale di forze ed energie, supera i confini della forma-Stato tradizionale. L'intelligenza collettiva, con le sue dinamiche interattive e distribuite nello spazio, richiama l'infrastruttura reticolare del web, e per quanto ci compete, anche dell'array di radiotelescopi del VSOP-HALCA, prefigurando la pervasività computazionale planetaria quasi fosse una sorta di cloud computing *ante litteram*.

18 G.T. Renner, *What war Has Taught Us about Geography*, "Journal of Geography", 9, 1944, p. 326 in M. Vegetti, *L'invenzione del globo. Spazio, potere, comunicazione nell'epoca dell'aria*, cit.

Il progetto VSOP-HALCA si inserisce, pertanto, in un contesto in cui l'aria, lo spazio e l'informazione si intrecciano, creando nuove «ecologie espanse di trasmissione»¹⁹. L'aria si configura come il mezzo e la spazialità della comunicazione a distanza, una spazialità atmosferica senza alcun mezzo di trasporto apparentemente tangibile, composto da circuiti invisibili attraverso cui si muovono onde elettromagnetiche e segnali elettrici.

Questa nuova dimensione spaziale, favorita e conclamata da VSOP-HALCA, non solo ha modificato il nostro rapporto con l'universo, ma riscritto anche il modo in cui intendiamo lo spazio, esigendo non solo mappe fisiche aggiornate, ma nuovi schemi cognitivi.

*

La nozione di spazio come concetto dinamico e multiforme prende forma nell'era dell'aria. Non è più un semplice vuoto da attraversare o un territorio da conquistare, ma un medium di interconnessione e flusso di dati. In questo senso, il progetto VSOP-HALCA è emblematico. Non si limita a essere un semplice strumento di osservazione astronomica, diventa un nodo fondamentale in una rete globale di informazioni, una vera e propria estensione dello spazio cibernetico. La sua capacità di raccogliere, trasmettere e processare enormi quantità di dati lo colloca in linea con la visione di Schmitt, sottolineando il ruolo sempre più cruciale delle tecnologie dell'informazione nella nostra comprensione dello spazio.

Inoltre, il VSOP-HALCA, in quanto rete globale di radiotelescopi, rappresenta la materializzazione di questa nuova dimensione spaziale favorita da una concezione distribuita dell'informazione. L'interconnettività e la capacità di processare dati a livelli prima inimmaginabili evidenziano il passaggio da un'era incentrata sull'esplorazione fisica dello spazio a un'epoca di esplorazione informazionale e cibernetica: transizione questa, favorita dalla fusione telematica di energia e informazione messa in atto dalla conquista dell'«etere» attraverso i mezzi della comunicazione elettronica. Pertanto, la Terra non è più solo un osservatore passivo, ma diviene parte attiva di un sistema che estende i propri sensori ben oltre i confini fisici, in un dominio dove l'informazione e la sua velocità di trasmissione diventano gli strumenti principali di esplorazione e comprensione.

Questa nuova realtà ha importanti implicazioni non solo per l'astronomia, ma anche per il modo in cui comprendiamo e interagiamo con il nostro ambiente²⁰. Questo rinnovamento concettuale, che scaturisce dal superamento dei confini terrestri, è emblematico dell'espansione dello spazio che VSOP-HALCA attua mediante la sovrapposizione dell'ecosistema computazionale a quello fisico. Questo processo di crescente ubiquità si manifesta nel modo in cui VSOP-HALCA trascende la tradizionale metrica topografica, muovendosi verso una

19 J. Gabrys, *Atmospheres of Communication*, in B. Crow, M. Longford, K. Sawchuk (a cura di), *The Wireless Spectrum. The Politics, Practices, and Poetics of Mobile Media*, University of Toronto Press, Toronto 2010, p. 47.

20 A questo proposito, riportiamo le parole di R. Debray, citate da J. Gabrys in *Atmospheres of Communication*, cit., p. 54, il quale scrive: «Lo spazio di una mediasfera non è oggettivo ma traiettivo. Sarebbe quindi necessario azzardare il termine “mediospazio”, il rapporto tra una determinata superficie e una durata. La “palla di terra” come mediasfera della grafosfera non è la stessa della videosfera. L'una ha una circonferenza di tre anni (Magellano) e l'altra di ventiquattro ore (Airbus)».

metrica topologica più complessa²¹. In tal senso, VSOP-HALCA non solo riflette lo spirito dei tempi, ma contribuisce attivamente all'invenzione di un nuovo mondo in cui la Terra agisce come medium per il rilevamento di altri mondi, ridefinendo così le coordinate della nostra esperienza. Esplorando le frontiere estese dell'ecosistema computazionale, si osserva che le ripercussioni vanno oltre la mera percezione dello spazio. L'innovazione in questo ambito inaugura una forma di "terraformazione cognitiva" per cui la geometria del progetto VSOP-HALCA altera il presunto universalismo della visione bidimensionale-euclidea²² dello spazio. Questo mutamento si manifesta, seguendo l'interpretazione di Vegetti²³, con l'adozione di una prospettiva che enfatizza verticalità e volumetria, superando così la geometria piana che ha caratterizzato finora le interazioni umane.

In tal modo, la Terra si presenta come una «geotecnologia»²⁴ avanzata, un singolo sistema sensoriale artificiale di proporzioni planetarie che abbraccia e connette diverse scale spazio-temporali. Più precisamente, la Terra si configura come una superficie (radio) sensibile, estesa eppure non esente da lacune, in cui ogni singolo radiotelescopio può essere equiparato al fotodiodo di una fotocamera digitale.

Questa visione di VSOP-HALCA come rete estesa si allinea con l'idea di una griglia globale di sensori, in cui ogni cella corrisponde a un radiotelescopio che rileva le parti del tutto e le invia a un sistema di elaborazione: un ecosistema elettronico-computazionale che avvolge la Terra, prefigurando in questo modo l'ubiquitous computing dei nostri giorni. Tale concezione può trovare le proprie radici nel sistema reticolare di L.F. Richardson²⁵, sviluppato agli inizi del XX secolo per le previsioni meteorologiche, il quale postulava una rappresentazione topologica dello spazio congiunta a un'elaborazione distribuita del calcolo. Difatti, la proposta di Richardson di un vasto numero di calcolatori, ciascuno dedicato a una specifica porzione di un'equazione più complessa e distribuiti su una griglia globale per effettuare previsioni meteorologiche, riflette una metodologia che oggi trova corrispondenza nella computazione distribuita e nell'elaborazione collaborativa a distanza. Ogni calcolatore, assimilabile a un nodo di una rete informatica, contribuiva al

21 Il passaggio da una metrica topografica a una metrica topologica suggerisce un cambiamento dal vedere lo spazio come un insieme di luoghi fisici (topografici) a vederlo come una rete di relazioni e connessioni (topologiche). Questo concetto è centrale nella teoria dei network, dove le connessioni e i flussi di informazione sono più importanti della posizione fisica. Per ulteriori approfondimenti inerenti alla definizione di matrice topografica e topologica nell'ambito della mondializzazione, si veda J. Lévy, *Inventare il mondo. Una geografia della mondializzazione*, Bruno Mondadori, Milano 2010.

22 A questo proposito, per quanto concerne l'affermazione della logica del globo, in antitesi a una concezione euclidea dello spazio, si veda, per esempio, F. Farinelli, *Geografia. Un'introduzione ai modelli del mondo*, Einaudi, Torino 2003; Id., *La crisi della ragione cartografica*, Einaudi, Torino, 2009; P. Sloterdijk, *Il mondo dentro il capitale*, Meltemi, Roma 2006 e, sempre di P. Sloterdijk, la trilogia *Sfere*, Raffaello Cortina, Milano. Oltre a ciò, è bene sottolineare come l'aria, l'"etere" sia in contrasto con i dispositivi di rappresentazione prospettica, poiché, come già intuì Leonardo da Vinci (in J. Gabrys, *Atmospheres of Communication*, cit., p. 56) «il cielo non occupa un posto e non può essere misurato; e per quanto riguarda le nuvole, non si possono fissare i loro contorni o analizzare le loro forme in termini di superfici».

23 M. Vegetti, *L'invenzione del globo. Spazio, potere, comunicazione nell'epoca dell'aria*, cit., p. 42.

24 Per ulteriori approfondimenti, si veda B.H. Bratton, *The Terraforming*, Stelka Press, Mosca 2019.

25 Il riferimento all'opera *Weather Prediction by Numerical Process* (1922) di L.F. Richardson, qui citato, è stato appreso dall'articolo di S. Franklin, *Cloud Control, or the Network as Medium*, "Cultural Politics", 3, 2012.

calcolo complessivo delle previsioni, evidenziando una sinergia che attualmente si estende oltre la meteorologia a vari ambiti della scienza e della tecnologia. In questa prospettiva, il mondo viene visto come un'entità discretizzabile e computabile, composta da singole celle responsabili di calcoli matematici, la cui interconnessione consentiva la visione d'insieme dello spazio atmosferico a tal punto che il mondo stesso diviene una sorta di macchina computazionale e al contempo computabile.

Questa espansione, o meglio, sovrapposizione tra spazio e computazione, conferma come questo processo di terraformazione vada oltre la semplice alterazione fisica del mondo. È una riconfigurazione del nostro modo di interagire e comprendere lo spazio, una terraformazione percettiva e cognitiva responsabile della creazione di nuovi ambienti non più necessariamente riconducibili all'umano, bensì a nuove geografie emergenti mediante procedure ed entità non umane.

A ben vedere, questo processo di computazione ubiquitaria *ante litteram*, la cui implementazione, come abbiamo visto, coincide con una terraformazione fisico-cognitiva, si configura più come un'ontogenesi che come una mera ontologia, poiché la sua essenza non è confinata unicamente all'osservazione di entità astronomiche preesistenti, ma si estende alla generazione di nuovi orizzonti epistemici e cognitivi. Questa ontogenesi si rivela bifronte: da un lato, l'array combinato terrestre-orbitante del progetto VSOP-HALCA amplifica la nostra capacità di osservare il cosmo, migliorando la risoluzione angolare e consentendo di percepire i fossili temporali di un universo in continua espansione geometrica. Dall'altro, l'infrastruttura planetaria composta da sensori, antenne, reti e atmosfera induce una riconfigurazione delle condizioni materiali ed energetiche che governano le interazioni umano-macchiniche.

Qui, la rete di radiotelescopi, operando sui nuclei galattici attivi (AGN) e le emissioni elettromagnetiche, trasforma queste entità in informazioni, dando forma letteralmente a nuove realtà precedentemente impercettibili. Questo processo va oltre la semplice traduzione di un oggetto preesistente, è piuttosto una co-creazione di mondi, ambienti e relazioni. Per tale ragione, diviene plausibile sostenere come tali tecnologie non mirino solo a compensare le carenze fisiologiche umane, bensì a rivelare aspetti dell'universo altrimenti inaccessibili. In questa luce, la Terra, in quanto medium di osservazione e interazione, non deve essere interpretata come una mera estensione protesica dell'umano. Essa si configura, invece, come una nuova «tecnogeografia»²⁶, che emerge dall'interazione sinergica tra l'umano, la macchina e i rispettivi ecosistemi, ridefinendo il modo in cui comprendiamo il nostro ambiente cosmico e tecnologico.

²⁶ Termine tratto dal pensiero di G. Simondon e ripreso in J. Gabrys, *Program Earth. Environmental Sensing Technology and the Making of a Computational Planet*, University of Minnesota Press, Minneapolis 2016.

All'interno di questa nuova ecologia spaziale, le onde radio e le telecomunicazioni non sono solo strumenti di trasmissione, ma diventano estensioni del nostro ambiente percettivo, ampliando il nostro raggio di interazione con l'universo. La rete di radiotelescopi del VSOP-HALCA funge da sistema nervoso di un organismo globale, in cui ogni antenna, il satellite HALCA e le stazioni di terra contribuiscono a una collettività di informazioni. Questa rete di interconnessioni e interdipendenze tra rilevamenti e dati costituisce una forma di intelligenza collettiva che va oltre la semplice collaborazione umana. Rappresenta una sinergia tra capacità umana di osservare e potenza computazionale delle macchine, queste ultime in grado di processare e analizzare dataset di dimensioni e complessità ben al di là dell'elaborazione umana. All'interno di questo scenario, emerge una nuova forma di esperienza esterna e condivisa: un'intelligenza che si estende oltre l'ambito del singolo individuo e si diffonde nell'intero spettro dei dati aggregati, nell'interconnessione in rete di radiotelescopi e, più ampiamente, nello spazio (cosmico) che ci circonda. Questa non si realizza all'interno di una singola installazione umana o tecnica, ma attraverso la letterale messa in rete dell'intero pianeta, trasformandolo in uno strumento e in un esperimento di sensori-percezione su scala planetaria.

In questi termini, VSOP-HALCA rappresenta un salto concettuale dall'osservazione isolata alla percezione integrata, in cui il nostro pianeta non è più solo un luogo da abitare, ma una piattaforma dinamica per esplorare e comprendere l'universo. La sua esistenza e il suo funzionamento rimodellano la nostra comprensione dello spazio come una tessitura intricata di relazioni e connessioni, svelando un nuovo orizzonte in cui lo spazio e la computazione non solo coesistono, ma sono inestricabilmente intrecciati in un dialogo continuo tra Terra e cosmo. Siamo dinanzi a una concezione relazionale della spazialità, non più fissa e statica come sulla Terra, ma aperta a nuove scale e metriche: una dimensione multiscalare, multinumerica e multistrato²⁷.

*

I dati interferometrici coesistono (rilevamento) e si intrecciano (correlazione), dando forma a un'intricata rete di relazioni e interazioni che tessono uno spazio la cui estensione mette in comunicazione il cosmo e la Terra. Dalla barca all'aereo, dal telegrafo alla televisione²⁸

²⁷ Sebbene tali concetti siano stati elaborati da J. Lévy in *Inventare il mondo. Una geografia della mondializzazione*, cit. per quanto concerne il recente processo di mondializzazione che ha interessato il nostro pianeta, la definizione di uno spazio multiplo e polidimensionale è applicabile, a nostro parere, anche alla descrizione del progetto VSOP-HALCA e alle sue conseguenze sulla nostra percezione del mondo.

²⁸ Nel corso del XIX secolo, si assistette alla nascita delle prime infrastrutture di telecomunicazione, un processo iniziato con l'innovazione del telegrafo elettrico ad opera di Samuel Morse nel 1832. Questo sviluppo tecnologico proseguì con l'apporto significativo di Alexander Graham Bell, il quale introdusse il telefono nel 1876. Successivamente, nel 1888, Heinrich Rudolf Hertz contribuì a questo campo con la sua rilevante dimostrazione dell'esistenza delle onde radio. Questa serie di progressi tecnologici raggiunse un altro punto di svolta all'alba del XX secolo, con l'avvento della televisione.

satellitare, da internet al VSOP-HALCA, tali tecnologie sono state realizzate e prodotte al fine di ridurre le distanze e la frizione a cui i corpi e la materia in genere sono sottoposti nelle infrastrutture delle reti di comunicazione e nei flussi di interscambio.

Detto in altro modo, l'array di VSOP-HALCA, la cui configurazione connette lo spazio e la Terra, viene a sommarsi alle tre precedenti tipologie di reti costituite rispettivamente dai cavi, dai satelliti e dalle antenne. Ai cavi sottomarini, prima coassiali ora prevalentemente in fibra ottica, si aggiungono i satelliti e le antenne rispettivamente per l'accesso globale a Internet e ai servizi di telefonia, da un lato, e le trasmissioni radio e la telefonia mobile, dall'altro. Ma se internet si muove principalmente lungo i cablaggi sottomarini²⁹, i tralicci del telefono o la fibra ottica, sostenuto da una dimensione infrastrutturale ctonica prevalentemente materica (siti, indirizzi, navigazione, ciberspazio), il VSOP-HALCA traccia le linee di uno spazio etereo nel vuoto del cosmo oltre l'esosfera dando a vedere la natura stessa dello spazio che, come già affermavano Leibniz e Einstein, «non è più considerato in termini di materia, ma come un ordine di relazioni di coesistenza. Lo spazio è relazionale e relativo»³⁰. In questi termini, l'array interferometrico spaziale si sovrappone ed estende la natura reticolare di internet intesa come tecnica della distanza e mezzo della coesistenza nella misura in cui VSOP-HALCA è un «paleoscopio»³¹ in grado di «avvicinare» ai nostri occhi lo spazio più profondo conciliando dimensioni temporali incommensurabilmente distanti.

VSOP-HALCA pare quindi portare a compimento la gestione dei campi elettromagnetici messi in atto per la riduzione delle distanze e la gestione dell'informazione che dall'avvento del telegrafo³² all'implementazione della rete internet ha caratterizzato lo scambio e il flusso di informazioni e beni immateriali. Tale riduzione ha a che vedere con la velocità dei flussi, con il carattere sincronico e asincronico delle informazioni veicolate dalla luce che

29 Nel contesto dello sviluppo delle telecomunicazioni, si osserva che il telegrafo, che vide la posa dei suoi primi cavi transatlantici negli ultimi anni del decennio 1860, e la radio, che stabilì il suo primo collegamento radio transatlantico verso la fine dello stesso secolo, rappresentano tappe fondamentali. Tuttavia, occorre attendere fino al 1956 per la realizzazione del primo cavo telefonico transatlantico. Un aspetto distintivo di queste prime reti di telecomunicazione era la loro marcata specializzazione e, di conseguenza, la loro incompatibilità funzionale. Per esempio, un cavo telegrafico non era in grado di trasmettere segnali vocali, né la radio poteva veicolare immagini. Questa situazione imponeva la necessità di sviluppare infrastrutture dedicate per ogni diverso tipo di comunicazione. Un cambiamento sostanziale si verificò nella seconda metà del XX secolo, in particolare con l'introduzione dei satelliti di comunicazione e della fibra ottica. Queste nuove reti si distinguevano per la loro capacità di trasmettere simultaneamente suoni, immagini e dati informatici. Per maggiori approfondimenti si veda, J. Lévy, *Inventare il mondo. Una geografia della mondializzazione*, cit., pp. 196-200. Facendo nostre le parole di D. Kahn in J. Parikka, *A Geology of Media*, University of Minnesota Press, Minneapolis 2015, pp.71-72, la cultura della comunicazione dei media tecnici potrebbe essere così scandita: comunicazione sotterranea dei messaggi telegrafici e telefonici propri del XIX secolo; l'inclusione della ionosfera con l'avvento negli anni Venti del XX secolo della radio; conquista dello spazio esterno dopo la Seconda Guerra Mondiale con i primi satelliti militari in orbita, tracciando una traiettoria che dal sottosuolo raggiunge la ionosfera passando per il soprassuolo.

30 J. Lévy, *Inventare il mondo. Una geografia della mondializzazione*, cit., p. 88.

31 J. D. Peters, *Space, Time, and Communication*, "Canadian Journal of Communication", 28, 2003.

32 Sebbene le transazioni a distanza siano precedenti all'avvento del telegrafo, grazie ai sistemi della posta a staffetta e delle cambiali, solo con l'implementazione delle linee telegrafiche avvenuta alla fine del XVIII secolo si assiste a uno scambio di informazioni su grande scala. Questa invenzione propriamente moderna, non dipende solo dalla volontà degli individui di voler dilatare lo spazio delle interazioni, incrementando un numero sempre più grande di scambi, ma dalla volontà di connettersi con ciò che è lontano. Si veda J. Lévy, *Inventare il mondo. Una geografia della mondializzazione*, cit., pp. 182-183.

fa della Terra un luogo reticolare fondato sulla connessione tra distanze spazio-temporali apparentemente incolmabili e inconciliabili.

Conclusione

Con l'introduzione di elementi come il radiotelescopio e l'ampliamento delle capacità di rilevamento dello spettro elettromagnetico, il VSOP-HALCA ha contribuito a trasformare lo spazio da fisico a elettronico, riducendo apparentemente il peso della materia, rendendo fluido e dinamico ciò che prima opponeva resistenza e attriti. D'altronde, il progetto VSOP-HALCA non fa altro che sancire definitivamente l'aria come elemento, o meglio, come spazio per eccellenza deputato alla tecnica, all'informatica disincarnata volta all'occupazione dell'"etere", alla colonizzazione del cosmo e all'invenzione di uno spazio virtuale mediante la sua stessa natura informe, gassosa, liscia, il suo volume neutro e percorribile in ogni direzione, introducendo un'era di interazione sinergica tra umanità, tecnologia e il pianeta Terra. Nel contesto dell'era dell'aria, per la precisione nella seconda air age dominata dall'elettronica e dalla cibernetica, il progetto VSOP-HALCA ha svolto un ruolo cruciale, fungendo da pioniere nell'uso delle onde radio e delle telecomunicazioni per l'astronomia. Con la sua capacità di trasmettere e ricevere dati a livelli senza precedenti, il progetto ha rappresentato un punto di svolta, segnando l'inizio di una nuova era nella quale la Terra, attraverso la fusione e la conseguente equivalenza dell'elettronica e dell'informatica, propria dei sistemi di telecomunicazione avanzati della cibernetica, è diventata un medium di rilevamento, un ecosistema cibernetico-informatico essenziale per l'osservazione e lo studio dell'universo. In conclusione, il progetto si è distinto come una delle manifestazioni più significative di un passaggio epocale che ha visto la convergenza tra spazio, tecnologia e percezione umana. Attraverso il VSOP-HALCA, abbiamo assistito a una terraformazione cognitiva, una riconfigurazione del nostro modo di interagire e comprendere lo spazio. Questa nuova realtà non solo ha importanti implicazioni per l'astronomia, ma ridefinisce anche il modo in cui viviamo e interagiamo con il nostro ambiente, segnando l'inizio di una nuova era nella quale la Terra funge da interfaccia attiva tra l'umanità e l'immensità dell'universo.