

Stima delle proprietà di sistemi ottici nelle microonde tramite l'utilizzo di reti neurali

Eleonora Gatti

La **CMB**, Cosmic Microwave Background, è la radiazione a microonde di fondo cosmico che permea l'intero Universo, originatasi dal disaccoppiamento tra materia e radiazione, avvenuto circa 380 000 anni dopo il Big Bang. Lo studio della CMB è estremamente importante perché consente di studiare le condizioni in cui l'Universo si è formato, andando a caratterizzare i suoi parametri fisici in tempi molto prossimi al Big Bang (fino a 10^{-30} s).

Negli esperimenti di CMB, e più in generale in qualsiasi esperimento di radioastronomia, è molto importante non solo misurare il segnale, ma anche ricostruire accuratamente la sua direzione di provenienza. La risposta ottica di un sistema si quantifica solitamente tramite il cosiddetto fascio d'antenna, una funzione matematica γ che associa a una direzione sulla sfera celeste (θ, ϕ) un numero puro che indica l'efficienza nel catturare la radiazione: $\gamma(\theta, \phi) = 1$ se l'efficienza è massima, $\gamma(\theta, \phi) = 0$ se lo strumento è cieco lungo tale direzione. La funzione $\gamma(\theta, \phi)$ definisce il **diagramma di radiazione**. Tale diagramma mostra tipicamente la presenza di un *main beam*, un lobo principale nella posizione del polo nord ($\theta = 0$), nel quale è contenuta la maggior parte della radiazione.

A partire dal diagramma di radiazione si definiscono alcuni parametri che permettono una sua descrizione. I parametri analizzati in questo lavoro di tesi sono: la **Full Width Half Maximum** (FWHM) del main beam che è la larghezza angolare a metà della sua altezza; l'**ellitticità**, che misura il livello di simmetria intorno all'asse del main beam; la componente **co-polare massima**; la componente **cross-polare massima**.

I software per la simulazione di sistemi ottici simulano la propagazione della radiazione in un sistema ottico, consentendo di stimare $\gamma(\theta, \phi)$. Tuttavia sono molto dispendiosi in termini di tempo e per sistemi ottici complessi, con migliaia di detector sulla superficie focale, risulta impossibile una simulazione completa dell'ottica. Allo stesso tempo per raggiungere sensibilità strumentali elevate che consentano di rivelare segnali molto deboli, come ad esempio la stessa CMB, è fondamentale avere a disposizione vasti piani focali che permettano di utilizzare un elevato numero di rivelatori.

È quindi forte la necessità di trovare una via alternativa che consenta di stimare i parametri che descrivono il beam in una qualsiasi posizione.

L'obiettivo di questa tesi è quello di stabilire un criterio per discriminare la bontà dei diversi metodi di stima dei parametri del diagramma di radiazione, e di individuare metodi più rapidi per la stima di $\gamma(\theta, \phi)$, o almeno dei suoi parametri più rappresentativi. In particolare ho voluto verificare se una rete neurale riuscisse a predire i parametri di interesse più efficacemente rispetto ad un'interpolazione.

Ho effettuato le analisi a partire da un dataset, prodotto tramite il software GRASP, nel quale sono riportati i dati relativi all'ottica di STRIP, uno strumento ideato per effettuare misure di CMB a grandi scale angolari. Nel suddetto dataset sono presenti i parametri del beam elencati sopra (FWHM, ellitticità, ...) in diversi punti della superficie focale, espressi come coordinate (x, y, z) in uno spazio cartesiano e sono distribuiti su una griglia 13x13 lungo le componenti x e y . La griglia ha una dimensione di $\sim 70\text{cm} \times 70\text{cm}$, mentre la coordinata z varia tra 0 e 50mm. Attraverso tale dataset ho creato due subsets per effettuare rispettivamente l'interpolazione/training della rete e la verifica della bontà dei dati stimati.

Per stimare le proprietà di un diagramma di radiazione attraverso strumenti classici di interpolazione ho utilizzato due metodi: `interp2d` del modulo `scipy.interpolate`, basato su un'interpolazione lineare tra punti adiacenti, e `curve_fit` del modulo `scipy.optimize`, con cui ho fatto un fit ai minimi quadrati tra i dati e un paraboloide. Dal momento che `interp2d` ha mostrato problemi, soprattutto per i punti ai bordi del piano focale, nel resto della mia analisi ho trascurato di includerlo nei confronti.

Parallelamente ho stimato il valore dei parametri attraverso reti neurali di tipo *feed forward* e *fully connected*. Ho creato 6 diverse architetture di rete che variano per funzione di attivazione (*Tanh* o *Sigmoid*) e numero di hidden layers (1, 2, 3). I risultati che ho ottenuto mostrano che le reti neurali hanno prestazioni migliori rispetto ai metodi di interpolazione, o al più equiparabili. Il grafico sotto riportato mostra la distribuzione degli errori relativa ad uno dei parametri elencati sopra (ellitticità), confrontata tra diversi tipi di reti neurali (in blu) e il caso migliore dell'interpolazione (in arancione).

