

Corso di Laurea triennale in Fisica (L-30)



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI MILANO

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

Relatore: Maurizio TOMASI
Correlatore: Cristian FRANCESCHET
Correlatrice: Sabrina REALINI

Tesi di Laurea di:
Eleonora GATTI
Matricola: 885664

Anno Accademico 2019/2020

Indice

1	Sistemi ottici nelle microonde	5
1.1	Utilizzo delle microonde in astrofisica	5
1.2	Diagramma di radiazione	6
1.3	Simulazione di sistemi ottici	8
2	Regressione con reti neurali	11
2.1	Machine learning e tipi di rete	11
2.2	Struttura di una rete neurale	11
3	Previsione delle proprietà di un diagramma di radiazione	13
3.1	Interpolazione	13
3.1.1	Interp2d	13
3.1.2	Curve Fit	13
3.1.3	Risultati dell'interpolazione	13
3.2	Reti neurali	13
3.2.1	Architettura della rete	13
3.2.2	Pre Training	13
3.2.3	Training	13
3.3	Confronto di risultati	13
4	Conclusioni	15

Capitolo 1

Sistemi ottici nelle microonde

Tutta l'informazione che abbiamo a disposizione su oggetti astronomici molto distanti è contenuta nella radiazione elettromagnetica emessa. Per secoli l'unico tipo di analisi possibile è stata quella nello spettro del visibile. Oggigiorno esistono svariate branche dell'astrofisica che analizzano segnali provenienti dall'Universo a diverse frequenze elettromagnetiche; una di queste branche riguarda lo studio del cosmo attraverso le microonde.

1.1 Utilizzo delle microonde in astrofisica

Il range delle lunghezze d'onda delle microonde è $\lambda \sim 1\text{mm} \div 10\text{cm}$ ¹.

È estremamente importante fare osservazioni a grandi lunghezze d'onda, nel millimetrico e oltre, poichè esistono numerosissime sorgenti cosmologiche che emettono in questo range e possono essere analizzate tramite sistemi ottici nelle microonde. I segnali più comunemente studiati in radio astronomia e attraverso le microonde sono:

- Radiazione emessa da gas ionizzato;
- Radiazione di sincrotrone, dovuta al moto di particelle cariche libere di muoversi nell'Universo e deviate da campi magnetici;
- Effetto Sunyaev-Zeldovich, che permette di rivelare ammassi di galassie altrimenti non visibili;
- Emissioni del Sole;
- Radiazioni da regioni H_{II} , si tratta di regioni nello spazio in cui sono presenti stelle molto calde (di tipo O o di tipo B) che ionizzano il gas intorno ad esse il quale emette nelle microonde e nel radio;
- Supernovae e resti di Supernovae²;

¹Il confine tra onde radio e microonde non è netto, spesso si parla di radio estendendo il range di lunghezze d'onda anche a quello delle microonde.

²La Crab Nebula, per esempio, è estremamente visibile nelle microonde.

- Pulsar;
- Radio galassie;
- CMB.

La **CMB**, Cosmic Microwave Background, è la radiazione a microonde di fondo cosmico che permea l'intero Universo. Secondo il *Modello Cosmologico Standard (SCM)* l'Universo ha avuto origine circa 14 miliardi di anni fa da una singolarità iniziale: il *Big Bang*.

Nei primissimi istanti dopo il *Big Bang* vi fu una rapidissima fase di espansione (10^{-33} s), detta *inflazione*, seguita da un'espansione più lenta e regolare, che continua tutt'ora. Inizialmente materia e radiazione erano in equilibrio in un plasma estremamente caldo; la progressiva espansione ha causato un abbassamento della temperatura del plasma. L'equilibrio tra materia e radiazione venne a mancare quando la temperatura raggiunse $T \simeq 3000$ K. Questo causò il *disaccoppiamento* tra materia e radiazione: la maggior parte degli elettroni venne catturata dai nuclei atomici permettendo la formazione dei primi atomi neutri. Convenzionalmente si considera come tempo al quale si è verificato il *disaccoppiamento* tra materia e radiazione l'istante t_{dec} in cui il libero cammino medio dei fotoni divenne maggiore della scala dell'Universo osservabile. Questo accadde a circa 380 000 anni dal *Big Bang* e da allora i fotoni primordiali sono liberi di vagare nello spazio e sono i responsabili della radiazione a microonde di fondo cosmico.

Data la vastità di campi in cui può essere effettuato uno studio nelle microonde, è di fondamentale importanza avere a disposizione un sistema ottico che permetta questo tipo di analisi. In particolare è necessario riconoscere la direzione dalla quale un determinato segnale microonde proviene.

1.2 Diagramma di radiazione

Un sistema ottico è un dispositivo il cui scopo è quello di registrare la luce proveniente dal cielo e mandarla ad un rivelatore. La risposta di un sistema ottico ideale può essere rappresentata come una delta di Dirac: non nulla solo lungo la linea di vista. Tuttavia i fenomeni di interferenza e diffrazione rendono la situazione molto più complessa; in particolare nella radio astronomia e nell'astronomia a microonde il problema è particolarmente importante poichè le dimensioni degli elementi ottici degli strumenti sono comparabili alle lunghezze d'onda d'interesse.

La risposta angolare di un sistema ottico è quantificata da una funzione $\gamma(\theta, \phi)$ detta *beam function* che definisce il **diagramma di radiazione**. Idealmente $\gamma(\theta, \phi)$ dovrebbe corrispondere a una delta di Dirac³, quello che viene in realtà osservato è una risposta simile a quella riportata in Fig. 1.1. È possibile osservare la presenza di un *main beam* e di lobi secondari. Tipicamente la maggior parte della radiazione

³Questa idealizzazione viene spesso chiamata *pencil beam idealization*

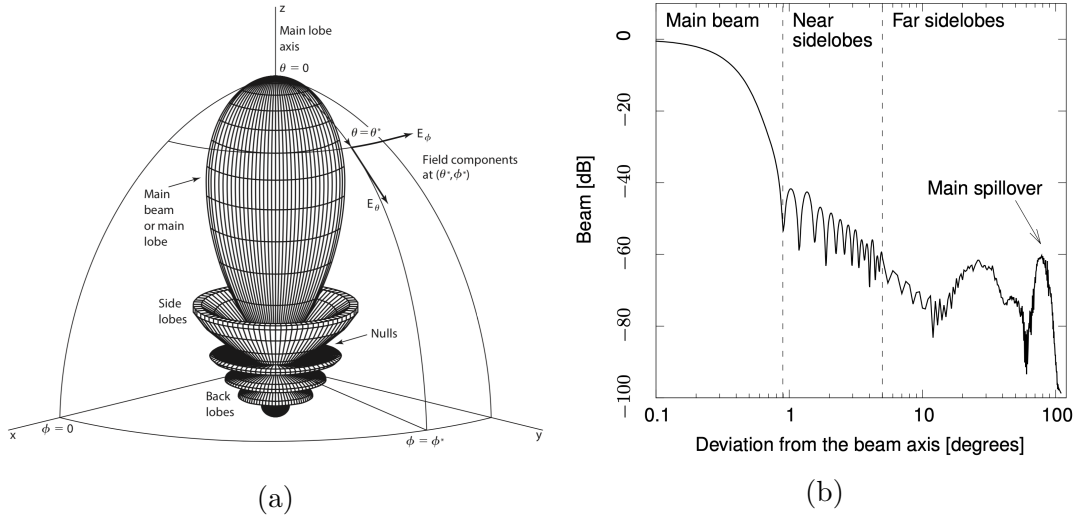


Figura 1.1: Tipico andamento della *beam function* $\gamma(\theta, \phi)$. La Fig. 1.1a rappresenta il diagramma di radiazione tridimensionale di un'antenna direzionale. [5]. La Fig. 1.1b rappresenta una sezione dello stesso grafico su un piano parallelo all'asse del main lobe. [2]

è contenuta nel main beam.

A partire dal diagramma di radiazione si definiscono alcuni parametri che permettono una sua descrizione; tali parametri sono i protagonisti di questo lavoro di tesi. La **Full Width Half Maximum** (FWHM) del main beam è la larghezza angolare a metà della sua altezza ed è uno dei parametri più importanti e più diffusi per la caratterizzazione della risoluzione di uno strumento. Nel corso dei prossimi capitoli verranno considerati due diversi valori per la FWHM, rispetto all'asse x e rispetto all'asse y . Attraverso queste due grandezze è possibile definire un ulteriore parametro: l'**ellitticità**. Questa è definita come il rapporto tra le due FWHM ponendo al numeratore la più grande tra FWHM_x e FWHM_y .

Hanno inoltre grande importanza i parametri che riguardano la polarizzazione. Supponiamo di studiare un'antenna in trasmissione⁴ e considerare una radiazione polarizzata. Fissiamo una direzione di polarizzazione; è allora possibile definire, rispetto a tale direzione, una componente *co-polare* ed una componente *cross-polare* della radiazione. La componente co-polare è data dalla frazione di radiazione con polarizzazione parallela alla direzione fissata mentre la componente cross-polare è data dalla frazione di radiazione con polarizzazione perpendicolare a quella fissata. In particolare i parametri utilizzati nei prossimi capitoli riguardano la componente **co-polare massima** e la componente **cross-polare massima**.

⁴Strumenti ottici per lo studio della CMB lavorano in ricezione ma è possibile studiare alternativamente un'antenna in trasmissione per il *principio di reciprocità*.

1.3 Simulazione di sistemi ottici

Simulare un sistema ottico significa studiare quanta potenza viene ricevuta in funzione dell'angolo. Tipicamente per simulare la risposta angolare di un sistema ottico si usa il software *GRASP* (General Reflector Antenna Software Package). Attraverso GRASP è stato possibile ottenere la tabella in Fig. 1.2 che riporta le caratteristiche del beam data una posizione (x, y, z) sulla superficie focale.

	id	x	y	z	fwhm_x	fwhm_y	e	co_max	cx_max
0	21	-0.316965	0.326756	50	0.398546	0.365183	1.091361	53.84	13,1
1	42	-0.318192	0.272044	50	0.364137	0.398634	1.094738	53.86	12,79
2	63	-0.319138	0.217441	50	0.364608	0.396464	1.087371	53.88	12,11
3	83	-0.320197	0.163140	45	0.361428	0.384678	1.064326	54.07	12,21
4	103	-0.321053	0.108822	40	0.358714	0.376443	1.049424	54.20	11,6
...
164	3464	0.329983	-0.108774	45	0.351460	0.385294	1.096266	54.17	12,91
165	3486	0.330462	-0.163029	50	0.351985	0.395278	1.122996	54.04	13,01
166	3507	0.331717	-0.217468	50	0.351115	0.398046	1.133661	54.02	12,87
167	3528	0.333326	-0.271998	50	0.350770	0.401112	1.143520	53.99	13,38
168	3549	0.335293	-0.326679	50	0.350950	0.404582	1.152821	53.95	13,95

Figura 1.2: Dataset relativo allo strumento STRIP ottenuto tramite la simulazione in GRASP. Tale dataset è stato utilizzato per l'analisi descritta nei capitoli successivi.

GRASP è uno strumento molto potente che permette di simulare sistemi ottici complessi. Tuttavia i tempi di calcolo di GRASP sono elevati⁵; per ogni simulazione, e quindi per ogni antenna, vengono costruiti dei grafici come quelli riportati in Fig. 1.3 e poi da quelli vengono ricavati i valori riportati nel dataset 1.2.

Nel caso di STRIP è ancora possibile simulare l'intera ottica tramite GRASP poichè il numero di antenne è piuttosto limitato. Tuttavia per sistemi ottici più complessi in cui il numero di antenne diventa di circa 2 ordini di grandezza superiore, risulta del tutto impossibile effettuare una simulazione completa dell'intera ottica. È quindi nata la necessità di trovare una via alternativa che permetta di stimare i parametri che descrivono il beam in una qualsiasi posizione.

⁵Per produrre i dati in Fig. 1.2 sono stati impiegati due giorni.

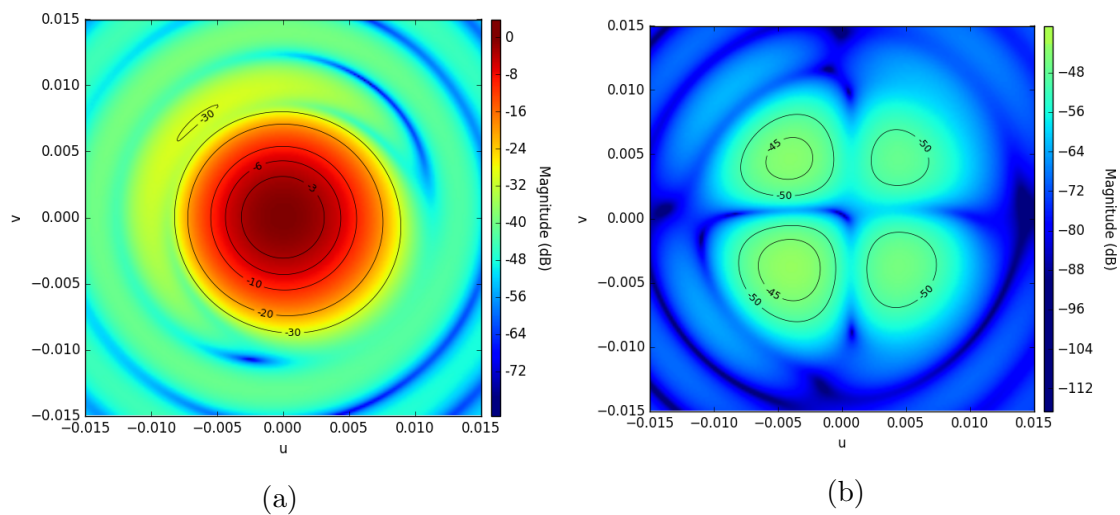


Figura 1.3: Diagramma della componente co-polare 1.3a e della componente cross-polare 1.3b di un'antenna off-axis. È possibile notare come il profilo del beam sia leggermente ellittico; per il sistema ottico di STRIP infatti l'ellitticità del fascio aumenta spostandosi dal centro del piano focale.

Capitolo 2

Regressione con reti neurali

2.1 Machine learning e tipi di rete

2.2 Struttura di una rete neurale

Capitolo 3

Previsione delle proprietà di un diagramma di radiazione

3.1 Interpolazione

3.1.1 Interp2d

3.1.2 Curve Fit

3.1.3 Risultati dell'interpolazione

3.2 Reti neurali

3.2.1 Architettura della rete

3.2.2 Pre Training

3.2.3 Training

3.3 Confronto di risultati

Capitolo 4

Conclusioni

Bibliografia

- [1] F. Chollet. *Deep Learning with Python*. Manning, 2018.
- [2] Planck Collaboration, Aghanim, N., Armitage-Caplan, C., Arnaud, M., Ashdown, M., Atrio-Barandela, F., Aumont, J., Baccigalupi, C., Banday, A. J., Barreiro, R. B., Battaner, E., Benabed, K., Benoît, A., Benoit-Lévy, A., Bernard, J.-P., Bersanelli, M., Bielewicz, P., Bobin, J., Bock, J. J., Bonaldi, A., Bonavera, L., Bond, J. R., Borrill, J., Bouchet, F. R., Bridges, M., Bucher, M., Burigana, C., Butler, R. C., Cappellini, B., Cardoso, J.-F., Catalano, A., Chamballu, A., Chen, X., Chiang, L.-Y., Christensen, P. R., Church, S., Colombi, S., Colombo, L. P. L., Crill, B. P., Curto, A., Cuttaia, F., Danese, L., Davies, R. D., Davis, R. J., de Bernardis, P., de Rosa, A., de Zotti, G., Delabrouille, J., Dickinson, C., Diego, J. M., Dole, H., Donzelli, S., Doré, O., Douspis, M., Dupac, X., Efstathiou, G., Enßlin, T. A., Eriksen, H. K., Finelli, F., Forni, O., Frailis, M., Franceschi, E., Gaier, T. C., Galeotta, S., Ganga, K., Giard, M., Giardino, G., Giraud-Héraud, Y., Gjerløw, E., González-Nuevo, J., Górski, K. M., Gratton, S., Gregorio, A., Gruppuso, A., Hansen, F. K., Hanson, D., Harrison, D., Henrot-Versillé, S., Hernández-Monteagudo, C., Herranz, D., Hildebrandt, S. R., Hivon, E., Hobson, M., Holmes, W. A., Hornstrup, A., Hovest, W., Hufenberger, K. M., Jaffe, A. H., Jaffe, T. R., Jewell, J., Jones, W. C., Juvela, M., Kangaslahti, P., Keihänen, E., Keskitalo, R., Kisner, T. S., Knoch, J., Knox, L., Kunz, M., Kurki-Suonio, H., Lagache, G., Lähteenmäki, A., Lamarre, J.-M., Lasenby, A., Laureijs, R. J., Lawrence, C. R., Leach, S., Leahy, J. P., Leonardi, R., Lesgourgues, J., Liguori, M., Lilje, P. B., Linden-Vørnle, M., López-Caniego, M., Lubin, P. M., Macías-Pérez, J. F., Maino, D., Mandolesi, N., Maris, M., Marshall, D. J., Martin, P. G., Martínez-González, E., Masi, S., Massardi, M., Matarrese, S., Matthai, F., Mazzotta, P., Meinhold, P. R., Melchiorri, A., Mendes, L., Mennella, A., Migliaccio, M., Mitra, S., Moneti, A., Montier, L., Morgante, G., Mortlock, D., Moss, A., Munshi, D., Naselsky, P., Natoli, P., Netterfield, C. B., Nørgaard-Nielsen, H. U., Novikov, D., Novikov, I., O'Dwyer, I. J., Osborne, S., Paci, F., Pagano, L., Paladini, R., Paoletti, D., Partridge, B., Pasian, F., Patanchon, G., Pearson, D., Peel, M., Perdureau, O., Perotto, L., Perrotta, F., Pierpaoli, E., Pietrobon, D., Plaszczynski, S., Pointecouteau, E., Polenta, G., Ponthieu, N., Popa, L., Poutanen, T., Pratt, G. W., Prézeau, G., Prunet, S., Puget, J.-L., Rachen, J. P., Rebolo, R., Reinecke, M., Remazeilles, M., Ricciardi, S., Riller, T., Rocha, G., Rosset, C., Rossetti, M., Roudier, G., Rubiño-Martín, J. A., Rusholme, B., Sandri, M., Santos, D., Scott, D., Seiffert,

- M. D., Shellard, E. P. S., Spencer, L. D., Starck, J.-L., Stolyarov, V., Stompor, R., Sureau, F., Sutton, D., Suur-Uski, A.-S., Sygnet, J.-F., Tauber, J. A., Tavagnacco, D., Terenzi, L., Toffolatti, L., Tomasi, M., Tristram, M., Tucci, M., Tuovinen, J., Türlér, M., Umana, G., Valenziano, L., Valiviita, J., Van Tent, B., Varis, J., Vielva, P., Villa, F., Vittorio, N., Wade, L. A., Wandelt, B. D., Watson, R., Wilkinson, A., Yvon, D., Zacchei, A., and Zonca, A. Planck 2013 results. v. lfi calibration. *A&A*, 571:A5, 2014.
- [3] S. Silver and I. of Electrical Engineers. *Microwave Antenna Theory and Design*. IEE electromagnetic waves series. P. Peregrinus, 1984.
- [4] E. Stevens and L. Antiga. *Deep Learning with PyTorch*. Manning, 2019.
- [5] M. Tomasi, C. Franceschet, and S. Realini. The quest for cmb b-modes.
- [6] T. Wilson and S. Hüttemeister. *Tools of Radio Astronomy: Problems and Solutions*. Astronomy and Astrophysics Library. Springer Berlin Heidelberg, 2012.