



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
FIRENZE

Scuola di Scienze Matematiche, Fisiche e Naturali
Corso di Laurea in Informatica

Tesi di Laurea

METODI DI APPRENDIMENTO AUTOMATICO
PER LA PREDIZIONE DELLA QUALITÀ DI
IMMAGINI SAR DESPECKLED

MACHINE LEARNING METHODS FOR THE
PREDICTION OF DESPECKLED IMAGE
QUALITY

YOUNESS AHARRAM

Relatore: *Daniele Baracchi*

Correlatori: *Fabrizio Argenti, Tommaso Pecorella*

Anno Accademico 2025-2026

Youness Aharram: *METODI DI APPRENDIMENTO AUTOMATICO PER
LA PREDIZIONE DELLA QUALITÀ DI IMMAGINI SAR DESPECKLED*,
Corso di Laurea in Informatica, © Anno Accademico 2025-2026

CONTENTS

List of Figures	3
1 Introduzione	7
2 State of the Art	9
Bibliography	11

LIST OF FIGURES

"Insert citation"
— *Insert citation's author*

INTRODUZIONE

I satelliti SAR sono satelliti dotati di un radar ad apertura sintetica che permette loro di acquisire immagini della superficie terrestre indipendentemente dalle condizioni meteorologiche e dalla luce solare. I satelliti SAR, grazie a questa loro capacità, trovano applicazione in molteplici contesti disciplinari. Ambito geologico, sono impiegati per il monitoraggio del suolo e dei processi geomorfologici, consentendo la mappatura di foreste, deserti e aree soggette a trasformazioni ambientali. Inoltre, risultano particolarmente efficaci nell'analisi dei fenomeni di deforestazione attraverso il rilevamento dei cambiamenti nella copertura boschiva. Marittimo, permettono di localizzare navi anche in condizioni meteorologiche avverse e di rilevare sversamenti di petrolio o altre sostanze inquinanti. Infrastrutture e urbanistica, vengono utilizzati per misurare gli spostamenti del terreno e delle aree urbane, oltre che per il controllo di dighe, ponti e ferrovie, e per l'osservazione dello sviluppo delle città. Il funzionamento di questo tipo di satellite si basa sull'uso di onde radar che vengono inviate verso la Terra. Questi impulsi elettromagnetici rimbalzano sul terreno e sugli oggetti come edifici o vegetazione e tornano al satellite. Quest'ultimo analizzando il segnale di ritorno riesce ad ottenere informazioni sia sull'intensità del riflesso sia sul tempo impiegato dal segnale per tornare, dati fondamentali per ricostruire l'immagine del territorio. Il punto di forza del SAR è l'apertura sintetica. Poiché il satellite si muove lungo la sua orbita, i segnali raccolti in posizioni diverse vengono combinati insieme. Questo processo permette di simulare un'antenna molto più grande di quella reale, ottenendo così immagini ad altissima risoluzione, molto più dettagliate di quelle che un radar di dimensioni fisiche limitate potrebbe generare da solo. In pratica, il movimento del satellite trasforma un radar relativamente piccolo in uno strumento potentissimo per osservare il pianeta. L'immagine così generata però presenta un particolare tipo di rumore. Quest'ultimo si forma quando un impulso radar colpisce il terreno, questo non riflette semplicemente un segnale uniforme. In

realtà, il segnale viene riflesso da moltissimi piccoli scatter presenti sulla superficie come foglie, rocce o edifici. Tutti questi ritorni interferiscono tra di loro, sommando le onde con fasi diverse. Il risultato di questa interferenza prende il nome di Speckle. Questo tipo di rumore non è un errore del satellite o del radar, ma una caratteristica intrinseca del tipo di misura e si presenta con un pattern granuloso che rende l'immagine difficile da interpretare ed analizzare. Il processo di riduzione dello speckle prende il nome di despeckling. Quest'ultimo cerca di smussare o filtrare il rumore granulare senza però perdere le informazioni reali presenti nell'immagine. In letteratura vi sono molteplici approcci: alcuni si basano su filtri spaziali che analizzano i pixel vicini, altri usano tecniche più sofisticate come statistica multivarianza o metodi di deep learning. Ogni approccio ha i suoi punti di forza e le sue lacune sulla base del tipo di ambiente rappresentato nell'immagine. Lo scopo di questa tesi è cercare di unire i punti di forza di alcuni modelli in modo da ottenere l'immagine con il despeckling più accurato possibile. Per ottenere ciò si utilizza tecniche di machine learning per predire la qualità di un'immagine denoised attraverso una mappa di qualità. Ad ogni modello, è associata una mappa che indica, pixel per pixel dove il modello ha funzionato meglio e dove invece peggio. Queste mappe sono essenziali nel processo di fusione delle immagini despeckled dei vari modelli in un'unica immagine, in quanto determinano i pesi di una media pesata.

STATE OF THE ART

Negli ultimi trent'anni sono stati proposti numerosi metodi per la riduzione dello speckle nelle immagini SAR. I primi approcci sfruttano filtri spaziali come Lee, Frost e Kuan. Questi operavano direttamente nel dominio dell'immagine, cioè sui pixel, sfruttando finestre locali per stimare statisticamente il rumore e ridurlo. Erano strumenti semplici, poco costosi dal punto di vista computazionale ed efficaci ma soffrivano di un limite strutturale. Per attenuare lo speckle tendevano a smussare anche i dettagli fini, specialmente lungo i bordi o nelle aree eterogenee. Con lo sviluppo della teoria delle trasformate multisensoriale negli anni Novanta, si passò ad un approccio diverso. Invece di agire direttamente sull'immagine, si iniziò a trasformarla in un dominio in cui il segnale e il rumore potessero essere separati. Nascono così i metodi basati su trasformata, come quelli che usano wavelet. Questi strumenti rappresentano un'evoluzione concettuale dei filtri spaziali, perchè superano alcune loro debolezze: riescono a distinguere meglio il rumore dalle strutture significative, ad adattarsi a diverse scale ed a preservare in maniera più accurata bordi, texture e linee sottili. Tuttavia, portano con sé una maggiore complessità computazionale e la possibilità di introdurre artefatti se non calibrati con attenzione. Infine dato che lo speckle è un rumore moltiplicativo e non semplicemente additivo, se non viene trasformato prima, la wavelet può non essere del tutto efficace. Alcuni di queste tipologie di filtri sono stati illustrati e confrontati nell'articolo *A Tutorial on Speckle Reduction in Synthetic Aperture Radar Images* [1]. Negli ultimi anni, l'attenzione si è spostata ancora più avanti verso i metodi non locali, come i filtri non local means o BM3D adattati per le immagini SAR. Qui l'idea è radicalmente diversa, ovvero non ci si limita più a guardare in un intorno locale del pixel, ma si cercano nel resto dell'immagine regioni simili e si usano queste corrispondenze per ridurre il rumore. In questo modo lo speckle viene attenuato in maniera molto efficace, mentre i dettagli strutturali si preservano quasi intatti. La qualità delle immagini risultanti è general-

mente superiore a quella ottenuta con filtri locali o multirisoluzione, ciò comporta però un costo computazionale elevato e la necessità di algoritmi sofisticati per gestire le similitudini tra regioni. Negli ultimi dieci anni si è aperta una nuova fase, spinta dall'esplosione del deep learning. Come riportato nell'articolo *Deep Learning for SAR Images Despeckling* [2], l'idea è che le reti neurali, in particolare convoluzionali o basate su autoencoder, possano imparare direttamente dai dati le caratteristiche dello speckle e il modo migliore per ridurlo. Questo approccio non si basa più nell'assumere una distribuzione statistica del rumore o una struttura matematica da preservare, ma si affida alla capacità della rete di apprendere automaticamente dalle coppie di immagini rumorose e pulite. I risultati hanno portato ad una qualità visiva migliore e un'eccellente preservazione dei dettagli. D'altro canto, le reti neurali hanno bisogno di grandi quantità di dati ben calibrati per l'addestramento e possono soffrire di scarsa generalizzazione se applicate a scenari diversi da quelli su cui sono state addestrate oltre che ad un costo computazionale molto elevato. Le performance dei modelli di despeckling non è uniforme per tutti i tipi di scenari. La loro efficacia può variare in base alle caratteristiche statistiche del bioma come contesti di vegetazione, aree rocciose e urbane, poichè la distribuzione del rumore e le strutture da preservare differiscono sensibilmente. Un'immagine SAR potrebbe comprendere due o più tipi di biomi, ciò implica che utilizzando un unico modello di despeckling, indipendentemente da quale esso sia, l'immagine risultante avrà aree in cui è stata ripulita meglio e aree in cui è stata ripulita peggio a seconda di dove il modello per come è stato realizzato ha più facilità ad operare. L'obiettivo della tesi è quello di unire le caratteristiche migliori di determinate tecniche di despeckling, in modo tale che l'immagine risultante rispecchi il più possibile la realtà. Questo tipo di approccio non va a reinventare la ruota cioè non punta a realizzare un nuovo modello con cui è possibile fare denoising, ma è mirato a sfruttare i punti di forza di ciascun modello. Questo approccio che sfrutta tecniche moderne come la CNN permette di superare la necessità di individuare un unico modello di despeckling, che per sua natura tende a incontrare difficoltà in specifiche porzioni dell'immagine, ad esempio in presenza di determinati biomi poco adatti alle sue caratteristiche, senza comunque garantire risultati ottimali. Al contrario, essa combina più modelli che si integrano tra loro, compensando reciprocamente le rispettive limitazioni.

BIBLIOGRAPHY

- [1] Argenti, Lapin, Bianchi, and Alparone. A tutorial on speckle reduction in synthetic aperture radar images. *IEEE Xplore*, 1(2):6–35, 2013.
- [2] Lattari, Leon, Asaro, Rucci, Prati, and Matteucci. Deep learning for sar image despeckling. *remote sensing*, 1(1):20, 2019.