

# METODI DI SIMULAZIONE MICROMAGNETICA NEL DOMINIO DELLA FREQUENZA PER SISTEMI MAGNONICI 3D

*Massimiliano d'Aquino*

Dipartimento di Ingegneria Elettrica e delle Tecnologie dell'Informazione  
Università degli Studi di Napoli Federico II  
Via Claudio 21, 80125 Napoli

La magnonica[1] è un campo di ricerca emergente che studia l'utilizzo delle eccitazioni dinamiche nei sistemi magnetici, come le onde di spin, per il trasferimento e l'elaborazione di informazioni nei dispositivi su scala nanometrica. A differenza delle correnti elettriche, l'uso delle onde di spin offre vantaggi significativi, come l'assenza di perdite ohmiche e di riscaldamento per effetto Joule. A quasi vent'anni dalla proposta iniziale di impiegare le onde di spin nelle operazioni logiche[2], il settore ha registrato notevoli progressi teorici e sperimentali[3].

Le piccole oscillazioni della magnetizzazione possono essere studiate tramite simulazioni micromagnetiche nel dominio del tempo o con approcci alternativi nel dominio della frequenza. Le simulazioni temporali permettono di analizzare l'evoluzione della magnetizzazione sotto stimoli esterni, ma risultano spesso complesse e dispendiose in termini di tempo e risorse computazionali, soprattutto quando coinvolgono centinaia di migliaia di celle di discretizzazione e richiedono analisi spettrali complesse[4].

Un'alternativa promettente è rappresentata dalle tecniche nel dominio della frequenza, basate sul metodo della matrice dinamica[5], che prevede la linearizzazione della dinamica attorno a uno stato di equilibrio e la risoluzione di un problema agli autovalori per determinare modi e frequenze naturali di oscillazione. Tuttavia, questo metodo è limitato dalla necessità di calcolare e memorizzare matrici di grandi dimensioni, il cui costo computazionale cresce quadraticamente con il numero di celle.

Per superare tali limiti, sono stati sviluppati nuovi algoritmi di simulazione numerica nel dominio della frequenza, in grado di gestire sistemi ferromagnetici di geometria arbitraria[6]. Questi metodi si basano su una speciale formulazione lineare[7] della dinamica della magnetizzazione, adattabile sia a discretizzazioni a differenze finite (FD) che a elementi finiti (FEM), già impiegata per includere fluttuazioni termiche[8] e fenomeni non lineari[9]. Il primo strumento computazionale sviluppato è un risolutore di autovalori su larga scala, utile per ottenere i modi normali in condizioni conservative. Su questa base è stato poi sviluppato un solutore di risposta lineare per calcolare le oscillazioni stazionarie smorzate indotte da campi sinusoidali esterni[6].

È stata inoltre proposta una teoria semi-analitica che permette di calcolare rapidamente la dinamica di magnetizzazione indotta da campi RF in presenza di dissipazione sufficientemente bassa. Sono fornite formule analitiche per ricavare l'oscillazione AC della magnetizzazione, lo spettro di potenza e la potenza assorbita, utilizzando un numero limitato di modi propri del sistema.

Questi algoritmi sono progettati per essere *matrix-free*, mantenendo una scalabilità efficiente anche su larga scala. Per i solutori FD, si utilizza la FFT per il calcolo del campo magnetostatico con costo  $O(N \log N)$ , mentre per FEM si adotta un algoritmo ibrido FEM/BEM, accelerato con tecniche H2-matrix per raggiungere una scalabilità quasi lineare. Infine, l'implementazione FEM è ottimizzata per supportare la parallelizzazione e l'uso opzionale di GPU, rendendo i calcoli su larga scala ancora più accessibili.

Questi avanzamenti aprono la strada a simulazioni più veloci ed efficienti per lo studio della dinamica magnetica nei dispositivi di nuova generazione nonché allo studio emergente di sistemi nanomagnetici tridimensionali[10] che possono fungere da dispositivi magnonici riconfigurabili.

- [1] V. V. Kruglyak, S. O. Demokritov, and D. Grundler, “Magnonics,” *J. Phys. D: Appl. Phys.* 43, 264001 (2010).
- [2] R. Hertel, W. Wulfhekel, and J. Kirschner, “Domain-wall induced phase shifts in spin waves,” *Phys. Rev. Lett.* 93, 257202 (2004).
- [3] 3A. V. Chumak, P. Kabos, M. Wu et al., “Advances in magnetics—Roadmap on spin-wave computing,” *IEEE Trans. Magn.* 58, 1–72 (2022).
- [4] M. Dvornik, Y. Au, and V. V. Kruglyak, “Micromagnetic simulations in magnonics,” in *Magnonics: From Fundamentals to Applications, Topics in Applied Physics*, edited by S. O. Demokritov and A. N. Slavin (Springer, Berlin, 2013), pp. 101–115.
- [5] S. Labbé and P. Y. Bertin, “Microwave polarizability of ferrite particles with non-uniform magnetization,” *J. Magn. Magn. Mater.* 206, 93–105 (1999).
- [6] M. d’Aquino and R. Hertel, “Micromagnetic frequency-domain simulation methods for magnonic systems”, *J. Appl. Phys.* 133, 033902 (2023).
- [7] M. d’Aquino, C. Serpico, G. Miano, and C. Forestiere, “A novel formulation for the numerical computation of magnetization modes in complex micromagnetic systems,” *J. Comput. Phys.* 228, 6130–6149 (2009).
- [8] F. Bruckner, M. d’Aquino, C. Serpico, C. Abert, C. Vogler, and D. Suess, “Large scale finite-element simulation of micromagnetic thermal noise,” *J. Magn. Magn. Mater.* 475, 408–414 (2019).
- [9] S. Perna, F. Bruckner, C. Serpico, D. Suess, and M. d’Aquino, “Computational micromagnetics based on normal modes: Bridging the gap between macrospin and full spatial discretization,” *J. Magn. Magn. Mater.* 546, 168683 (2022).
- [10] G. Gubbiotti, A. Barman, S. Ladak et al., “2025 roadmap on 3D nanomagnetism”, *J. Phys.: Condens. Matter* 37 (2025) 143502.