

Macchina di Ising probabilistica con dispositivi spintronici

G. Finocchio¹, A. Giordano², A. Grimaldi^{1,3}, A. Hasan¹, E. Raimondo^{1,4},

¹ Dipartimento di Scienze Matematiche e Informatiche, Scienze Fisiche e Scienze della Terra,
Università degli Studi di Messina, Messina

² Dipartimento di Ingegneria, Università degli Studi di Messina, Messina

³ Dipartimento di Ingegneria Elettrica e dell'Informazione Politecnico di Bari, Bari

⁴ Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia,
Via di Vigna Murata 605, 00143 Roma (RM)

I problemi di ottimizzazione combinatoriale trovano molteplici applicazioni in settori diversi come industriali o di logistica. Promettenti per la risoluzione di tali problemi sono le macchine di Ising (IMs), e in particolare quelle di tipo probabilistico (PIMs), che offrono scalabilità e facile implementazione in hardware [1,2]. L'unità base delle PIMs è il bit probabilistico (p-bit), una unità bistabile (-1 e $+1$) stocastica controllabile mediante un segnale esterno. L'equazione adottata per aggiornare lo stato del p-bit comprende una componente deterministica ed una stocastica:

$$m_i(n+1) = \text{sgn}(\text{rand}(-1,1) + \tanh(I_i(n))) \quad (1)$$

Dove $\text{rand}(-1,1)$ è un numero random tra -1 e $+1$, e $I_i(n)$ è il segnale esterno che controlla, per mezzo della funzione tangente iperbolica, la probabilità dell' i -esimo p-bit di essere in uno stato o in un altro. Il processo di binarizzazione dello stato è gestito dalla funzione segno. $I_i(n)$ è funzione di tutti i p-bit costituenti il sistema:

$$I_i(n) = \beta \left(\sum_j J_{ij} m_j + h_i \right) \quad (1)$$

Dove la matrice $\mathbf{J}$ tiene in considerazione le interazioni tra i p-bit, mentre il vettore $\mathbf{h}$ è un campo locale che agisce sul singolo p-bit. Il parametro β rappresenta l'inverso della pseudo-temperatura del sistema, ed è di fondamentale importanza degli algoritmi di minimizzazione energetica. Dato un problema codificabile in un circuito logico, ed esempio il problema di massima soddisfaccibilità (MaxSAT), è possibile mapparlo in un modello di Ising (identificare gli elementi $\mathbf{J}$ ed $\mathbf{h}$). La scelta opportuna dell'algoritmo di minimizzazione energetica è un aspetto fondamentale per garantire che il sistema possa raggiungere il minimo energetico. Tre principali algoritmi sono stati approfonditi: il simulated annealing (SA), il parallel tempering (PT) e il simulated quantum annealing (SQA).

Le PIMs possono essere implementate sfruttando i dispositivi spintronici ed in particolare le giunzioni magnetiche ad effetto tunnel (MTJ) [3]. La MTJ un componente fondamentale nella tecnologia spintronica grazie alle sue caratteristiche di basso consumo energetico, dimensione nanometriche e compatibilità con la tecnologia CMOS.

Le caratteristiche fisiche dei p-bit implementati con le MTJ sono state identificate su diversi dispositivi. L'analisi ha rivelato una lieve deviazione rispetto alla curva ideale del p-bit. Questa deviazione, dovuta a fattori quali imperfezioni geometriche o piccoli difetti strutturali, risulta inevitabile. L'impatto della non idealità è stato studiato su una istanza MaxSAT usando i tre algoritmi di minimizzazione energetica. I risultati mostrati in figura 1

mostrano che SQA si distingue per l'elevata probabilità di successo e una notevole robustezza alle variazioni tra dispositivi.

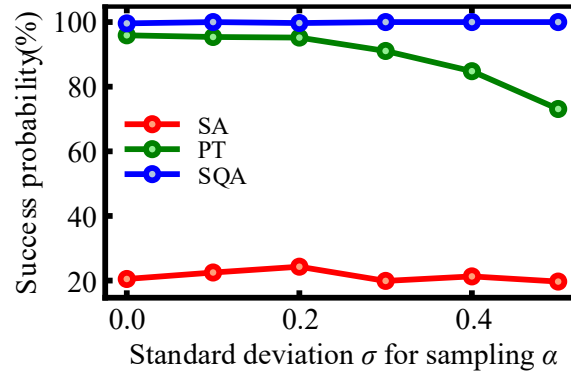


Figure 1: Confronto dei diversi algoritmi di minimizzazione energetica in funzione della deviazione standard di campionamento della variazioni del p-bit da una gaussiana con media unitaria, per una istanza di MaxSAT.

Biografia

- [1] T. Zhang et al., *A Review of Ising Machines Implemented in Conventional and Emerging Technologies*, IEEE Trans. Nanotechnol. **23**, 704 (2024).
- [2] N. A. Aadit, A. Grimaldi, M. Carpentieri, L. Theogarajan, J. M. Martinis, G. Finocchio, and K. Y. Camsari, *Massively Parallel Probabilistic Computing with Sparse Ising Machines*, Nat. Electron. **5**, 460 (2022).
- [3] A. Grimaldi, L. Mazza, E. Raimondo, P. Tullo, D. Rodrigues, K. Y. Camsari, V. Crupi, M. Carpentieri, V. Puliafito, and G. Finocchio, *Evaluating Spintronics-Compatible Implementations of Ising Machines*, Phys. Rev. Appl. **20**, 024005 (2023).