

Breaking the Orthogonality Barrier in Quantum LDPC Codes

2026 年 1 月 18 日

目次

1	Abstract	1
---	--------------------------	---

1 Abstract

古典的な低密度パリティ検査 (LDPC) 符号は、現代の通信およびストレージシステムの基盤を形成する、広く普及し確立された技術である。古典的な設定においては、正則な次数分布を維持しつつタナーグラフのガス (girth) を大きくすることが、良好な信念伝搬 (BP) 復号性能と大きな最小距離の両立につながることはよく知られている。

しかし、量子設定においては、量子 LDPC 符号がそのパリティ検査行列間に付加的な直交性制約を満たさなければならないため、この原理を直接適用することはできない。直交性と正則性の両方を単純な手法で強制すると、通常はガスが減少し、最小距離が構造的に上界 (アッパーバウンド) に制限されてしまう。

本研究では、交換性が制御された置換行列を用い、かつ構成における必要な部分にのみ直交性制約を限定することで、正則な検査行列構造を維持しつつ、この制限を克服する。この設計は、直交性、正則性、ガス、および最小距離の間の従来のトレードオフを打破し、大きなガスを持ち、かつ従来の距離上界に縛られない量子 LDPC 符号の構成を可能にする。

具体的な実証として、ガス 8、 $(3,12)$ 正則な $[[9216, 4612, \leq 48]]$ 量子 LDPC 符号を構成した。この符号は、BP 復号と低計算量の後処理アルゴリズムを組み合わせることで、誤り確率 4% の脱分極チャネルにおいて、 10^{-8} という極めて低いフレーム誤り率 (FER) を達成することを示す。