

Benchmarking the readout of a superconducting qubit for repeated measurements

S. Hazra,^{1,*} W. Dai,^{1,*} T. Connolly,¹ P. D. Kurilovich,¹ Z. Wang,¹ L. Frunzio,¹ and M. H. Devoret^{1,†}

¹*Department of Applied Physics, Yale University, New Haven, Connecticut 06520, USA
and Yale Quantum Institute, Yale University, New Haven, Connecticut 06520, USA*

(Dated: July 16, 2024)

Readout of superconducting qubits faces a trade-off between measurement speed and unwanted back-action on the qubit caused by the readout drive, such as T_1 degradation and leakage out of the computational subspace. The readout is typically benchmarked by integrating the readout signal and choosing a binary threshold to extract the “readout fidelity”. We show that such a characterization may significantly overlook readout-induced leakage errors. We introduce a method to quantitatively assess this error by repeatedly executing a composite operation—a readout preceded by a randomized qubit-flip. We apply this technique to characterize the dispersive readout of an intrinsically Purcell-protected qubit. We report a binary readout fidelity of 99.63% and quantum non-demolition (QND) fidelity exceeding 99.00% which takes into account a leakage error rate of $0.12 \pm 0.03\%$, under a repetition rate of $(380\text{ns})^{-1}$ for the composite operation.

Fast and accurate single-shot qubit readout is crucial for a multitude of quantum computing experiments including, measurement-based state preparation [1], entanglement generation [2–4] and quantum error correction (QEC) [5–10]. Recent advancements in superconducting qubit readout coupled with near-quantum-limited measurement efficiency have made it possible to demonstrate quantum error correction with both surface code [8, 9] and bosonic codes [5–7]. In these experiments, efficient entropy removal from the quantum system is achieved by repeated application of high fidelity readout and reset of the physical ancilla qubits. A quantum non-demolition (QND) measurement [11] perfectly correlates the post-readout state of the qubit with the readout outcome, alleviating the need for unconditional reset [12] of the ancilla. A purely dispersive interaction between a qubit and its readout resonator would yield a QND readout scheme. In reality, this interaction is approximately realized in superconducting circuits [13] when an artificial atom is linearly coupled to the readout resonator. The linear hybridization of the qubit and the readout resonator leads to Purcell decay of the qubit. This prevents arbitrary increase of the qubit-resonator dispersive interaction χ_{qr} and the external coupling rate of the resonator κ_r , which sets a maximum speed of the readout for a given power. Moreover, at higher readout power, the dispersive approximation breaks down [14], causing readout-induced leakage [15, 16] into the non-computational states of the physical qubit. These limitations prohibit the simultaneous pursuit of the readout speed, fidelity and QND-ness.

In QEC, entangling operations and ancilla readouts are repeated, as illustrated in Fig.1. The readout-induced leakage errors can leave the ancilla in undesirable highly-excited states for multiple cycles, and can also spread into neighbouring qubits [17]. Thus, even a small leakage probability poses a greater threat compared to discrimination error or Pauli error. Often, the “readout fidelity” [1, 18–23] extracted from the *binary-thresholded* outcomes is used as the only metric to experimentally

optimize the readout parameters. While such a metric is sufficient to quantify the Pauli error (occurring during the readout process) and the discrimination error, it fails to faithfully identify readout-induced leakage, especially if the latter occurs with a low probability compared to other readout errors. The standard measure of QND-ness as the correlation of two successive binary readout outcomes [21–23] also overlooks leakage when the readout outcomes of the leakage states predominantly fall on one side of the threshold. Therefore, such methods do not reflect the true character of the repeated readout operations. Is there a complete way to benchmark the readout operation with binary outcome?

In this Letter, we demonstrate a novel readout benchmarking technique, “pseudo-syndrome detection”, where we mimic a syndrome detection cycle in QEC by repeating a composite operation—a readout preceded by a random qubit flip. This method offers a faithful characterization of the readout under repeated implementations and provides an accurate estimation of the readout QND-ness. We perform the dispersive readout on a Purcell-protected transmon. We optimize the readout pulses

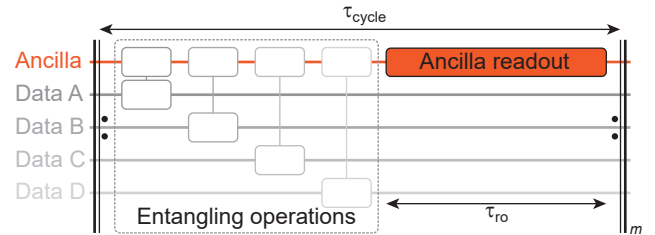


Figure 1. A syndrome detection cycle in QEC. Each cycle consists of an ancilla readout preceded by entangling operations with data qubits, mapping the syndrome onto the ancilla. We characterize the readout performance by mimicking this experiment on a single ancilla, with the “syndrome” artificially generated by randomly applying identity and bit-flip operations.

B Đánh dấu sự đọc của một qubit siêu dẫn để các phép đo lặp đi lặp lại

S. Hazra,^{1,*} W. Dai,^{1,*} T. Connolly,¹ P. D. Kurilovich,¹ Z. Wang,¹ L. Frunzio Viện, Đại học Yale, New Haven, Connecticut 06520, Hoa Kỳ (ngày: ngày 16 tháng 7 năm 2024)

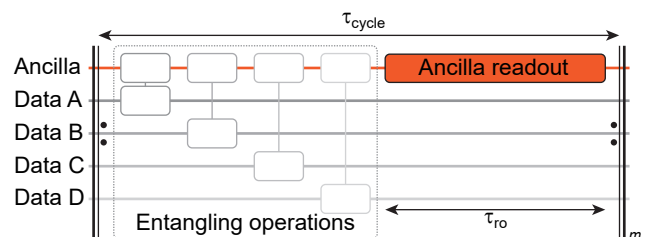
Độc các qubit siêu dẫn phải đối mặt với sự đánh đổi giữa tốc độ đo và hành động ngược không mong muốn trên qubit gây ra bởi ổ đĩa đọc, chẳng hạn như suy thoái T_1 và rò rỉ ra khỏi không gian con tính toán. Việc đọc thường được đánh dấu bằng cách tích hợp tín hiệu đọc và chọn ngưỡng nhị phân để trích xuất độ trung thực đọc của người đọc. Chúng tôi cho thấy rằng một sự thay đổi như vậy có thể bỏ qua đáng kể các lỗi rò rỉ do đọc. Chúng tôi giới thiệu một phương pháp để đánh giá một cách định lượng lỗi này bằng cách thực hiện liên tục một hoạt động tổng hợp đọc trước đó bởi một qubit-flip ngẫu nhiên. Chúng tôi áp dụng kỹ thuật này để mô tả sự đọc phân tán của một qubit được bảo vệ nội tại. Chúng tôi báo cáo mức độ trung thực đọc nhị phân là 99.63% và độ trung thực không hòa tan lượng tử (qND) vượt quá 99.00% có tính đến tỷ lệ lỗi rò rỉ là 0.12 ± 0 .

Việc đọc Qubit đơn nhanh và chính xác là rất quan trọng đối với vô số các thí nghiệm tính toán lượng tử bao gồm, chuẩn bị trạng thái dựa trên phép đo [1], tạo ra sự phát triển [2 Nott4] và hiệu chỉnh lỗi lượng tử (QEC) [5 .10]. Những tiến bộ gần đây trong việc đọc QBIT siêu dẫn kết hợp với hiệu quả phân tích gần như giới hạn gần như đã cho phép chứng minh hiệu chỉnh lỗi lượng tử với cả mã bề mặt [8, 9] và mã Bosonic [5 .7]. Trong các thí nghiệm này, việc loại bỏ entropy hiệu quả khỏi hệ thống lượng tử đạt được bằng cách áp dụng lặp đi lặp lại của việc đọc độ trung thực cao và đặt lại các qubit ancilla vật lý. Một phép đo không hòa tan lượng tử (QND) [11] hoàn toàn tương quan với trạng thái sau khi đọc của qubit với kết quả đọc, giúp đỡ sự cần thiết phải đặt lại vô điều kiện [12] của ancilla. Một tương tác hoàn toàn phân tán giữa một qubit và bộ cộng hưởng đọc của nó sẽ mang lại một sơ đồ đọc QND. Trong thực tế, sự tương tác này được thực hiện xấp xỉ trong các mạch siêu dẫn [13] khi một nguyên tử nhân tạo được kết hợp tuyến tính với bộ cộng hưởng đọc. Sự kết hợp tuyến tính của qubit và bộ cộng hưởng đọc dẫn đến phân rã purcell của qubit. Điều này ngăn chặn sự gia tăng tùy ý của tương tác phân tán bộ cộng đồng Qubit χ_{qr} và tốc độ ghép bên ngoài của bộ cộng hưởng κ_r , đặt tốc độ tối đa của lần đọc cho một công suất nhất định. Hơn nữa, ở công suất đọc cao hơn, sự gần gũi phân tán bị phá vỡ [14], gây ra rò rỉ do đọc [15, 16] và các trạng thái không tính toán của qubit vật lý. Những hạn chế này cấm theo đuổi đồng thời theo đuổi tốc độ đọc, độ trung thực và qnd-ness.

Trong QEC, các hoạt động vướng víu và các bài đọc ancilla được lặp lại, như được minh họa trong Hình.1. Các lỗi rò rỉ do đọc có thể khiến ANCILLA ở trạng thái kích thích không mong muốn trong nhiều chu kỳ và cũng có thể lan truyền thành các qubit lân cận [17]. Do đó, ngay cả một xác suất rò rỉ nhỏ cũng gây ra mối đe dọa lớn hơn so với lỗi phân tích hoặc lỗi Pauli. Thông thường, việc đọc sách của người Viking, [1, 18 ,23] được trích xuất từ các kết quả ngưỡng nhị phân được sử dụng làm số liệu duy nhất để thực nghiệm

Tối ưu hóa các tham số đọc. Mặc dù một số liệu như vậy là đủ để định lượng lỗi Pauli (xảy ra trong quá trình đọc) và lỗi phân biệt đối xử, nhưng nó không xác định một cách trung thực rò rỉ do đọc, đặc biệt nếu sau này xảy ra với xác suất thấp so với các lỗi đọc khác. Biện pháp tiêu chuẩn của QND-ness là mối tương quan của hai lần đọc nhị phân liên tiếp xuất hiện [21 Ném23] cũng bỏ qua rò rỉ khi kết quả đọc của các trạng thái rò rỉ chủ yếu rơi xuống một bên của ngưỡng. Do đó, các phương pháp như vậy không phản ánh đặc tính thực của các hoạt động đọc lặp lại. Có một cách hoàn chỉnh để điểm chuẩn hoạt động đọc với kết quả nhị phân?

Trong bức thư này, chúng tôi chứng minh một kỹ thuật đánh dấu đọc sách mới lạ, phát hiện giả giả, trong đó chúng tôi bắt chước một chu kỳ phát hiện hội chứng trong QEC bằng cách lặp lại một hoạt động tổng hợp, một lần đọc trước đó là một cú lật qubit. Phương pháp này cung cấp một nhân vật trung thành của việc đọc theo các triển khai lặp đi lặp lại và cung cấp một ước tính chính xác về Qnd đọc. Chúng tôi thực hiện việc đọc phân tán trên một transmon được bảo vệ được bảo vệ. Chúng tôi tối ưu hóa các xung đọc



Hình 1. Một chu kỳ phát hiện hội chứng trong QEC. Mỗi chu kỳ bao gồm một lần đọc ancilla đi trước bởi các hoạt động vướng víu với các qubit dữ liệu, ánh xạ hội chứng lên các hoạt động. Chúng tôi đặc trưng cho hiệu suất đọc bằng cách bắt chước thí nghiệm này trên một ancilla duy nhất, với hội chứng trực tuyến được tạo ra bằng cách áp dụng ngẫu nhiên các hoạt động nhận dạng và bit.