УДК 53.083.94

Квантовый детектор магнитных полей на основе кутрита

В.В.Землянов[1], С. И. Данилин[3], А.В. Лебедев[2], М.В. Суслов[1], А.Р. Шляхов[1], G. Blatter[2], A. Vepsalainen[3], G.S. Paraoanu[3], Г.Б. Лесовик[1,4]

[1]Московский физико-технический институт (государственный университет)
[2]Theoretische Physik, ETH Zürich
[3]Aalto University School of Science
[4]Институт теоретической физики им. Ландау РАН

Квантовая метрология – это одно из передовых направлений современной науки с важными и очевидными фундаментальными и прикладными аспектами. Нужно заметить, что до недавнего времени в этот термин вкладывался смысл, связанный с такими специфическими квантовыми эффектами, как эффект Джозефсона, квантовый эффект Холла. С помощью этих эффектов могут быть определены комбинации фундаментальных физических констант, что и используется для соответствующих измерений. В последние же годы термин «Квантовая метрология» несет также и иной смысл, относящийся к новым методам измерений, использующий квантовые интерференционные эффекты, позволяющие производить сверхточные измерения. Например, достижение гейзенберговского предела по точности в реальных экспериментах на NV-центрах в алмазах[1,2]. Отчасти эти исследования затрагивают фундаментальные вопросы (предельные возможности детекторов, оценка скорости извлечения информации), но также очевидно и прикладное значение таких исследований, состоящее в том, что возможно создание нового класса высокоточных измерительных приборов, с помощью которых можно будет как измерять классические сигналы, так и изучать квантовое поведение проводников и других объектов. Именно в этом направлении и лежит данная работа.

Нами разрабатывается идея использования кутрита в качестве детектора магнитного поля с использованием модифицированных схем измерения типа Китаева и полуклассического преобразования Фурье. Дискретная версия алгоритма на кубитах была разработана Лесовиком и др.[3] в 2009 году, и позже обобщена на случай произвольного базиса счета[4]. Было выяснено, что взаимодействие измерительного устройства с внешним сигналом удобно проводить, если предварительно перейти из вычислительного базиса $|n\rangle$ в базис счета $|\Psi_n\rangle$, являющимся квантовым преобразования Фурье от вычислительного базиса. Это следует из соображений, что события, соответствующие регистрации разного числа частиц, нужно отличать друг от друга детерминистичным образом (т.е. $\langle\Psi_i|\Psi_j\rangle = 0$), а также таким образом в процессе счета изменяются только фазы собственных состояний кубита, но не амплитуды, что значительно снижает помехи от измерительного прибора обратно в измеряемую систему. Процесс измерения K-кудитного регистра построен таким образом, что событие регистрации частицы соответствует унитарной эволюции j-го кубита $U_j = \exp(-i\phi_j\sigma_z/2)$, где σ_z – матрица Паули. Процедура считывания идентична полуклассическому преобразованию Фурье[5], когда измерение кудита следует производить вдоль оси, зависящей от результатов измерения предыдущих. В результате получаем искомое число в представлении по базису d.

На данный момент идет обобщения данной идеи на случай измерения непрерывной переменной – магнитного поля. В качестве квантовой системы мы берем сверхпроводниковый кубит «трансмон», выведенный из обычного режима («sweet spot») для повышения чувствительности по отношению к внешнему сигналу/шуму. При этом мы используем 3 наинизших уровня, т.е. кутритный режим. В отличии от дискретного алгоритма, где использовался K-кудитный регистр с различными параметрами связи с измеряемой системой, производятся серия измерений на одном кутрите. Процесс измерения построен по типу интерферометрии Ремси $\hat{R}(\phi(t)) = \hat{U}_y(-\pi/2)\hat{U}_z(\phi(t))\hat{U}_y(\pi/2)$ с изменяющимся временем свободной эволюции под действием исследуемого сигнала $\hat{U}_z(\phi(t))$. При этом первое измерение производится при максимальном времени t_0, которое ограничено сверху временем декогеренции кубита T_2, а последующие при $t_n = 3^{-n}t_0$. Производится исследование на поиск оптимальных процедуры приготовления и измерения состояний кутрита за минимальное время с максимальной точностью. На данном этапе получена следующая операция считывания.

$$\hat{U}_{readout} = \frac{1}{\sqrt{3}}\begin{pmatrix} e^{-i\frac{\pi}{6}} & -ie^{-i\varphi_0} & e^{-i\frac{5\pi}{6}} \\ -ie^{-i\varphi_0} & ie^{-2i\varphi_0} & -ie^{-i\varphi_0} \\ e^{-i\frac{5\pi}{6}} & -ie^{-i\varphi_0} & e^{-i\frac{\pi}{6}} \end{pmatrix}, \qquad \varphi_0 = -0.85246 \tag{1}$$

А соответствующие векторы базиса счета

$$\begin{aligned} |\Psi_0\rangle &= \frac{1}{\sqrt{3}}\left(|0\rangle + e^{i\varphi_0}e^{i\frac{\pi}{3}}|1\rangle + e^{i\frac{2\pi}{3}}|2\rangle\right) \\ |\Psi_1\rangle &= \frac{1}{\sqrt{3}}\left(|0\rangle - e^{i\varphi_0}|1\rangle + |2\rangle\right) \\ |\Psi_2\rangle &= \frac{1}{\sqrt{3}}\left(|0\rangle + e^{i\varphi_0}e^{i\frac{5\pi}{3}}|1\rangle + e^{i\frac{4\pi}{3}}|2\rangle\right) \end{aligned} \tag{2}$$

Планируется проведение эксперимента, где будет реализована данная схема.

Литература

1. *Twamley J. [et al.]* Nanoscale magnetometry using a single-spin system in diamond. // PhysRevB, 2011, 83, 125410.
2. *Wrachtrup J. [et al.]* Efficient route to high-bandwidth nanoscale magnetometry using single spins in diamond. // Scientific Reports, 2014, 4, 4677.
3. *Lesovik G.B., Suslov M.V., and Blatter G.* Quantum counting algorithm and its application in mesoscopic physics // Phys. Rev. A, 2010, 82, p. 012316.
4. *Suslov M.V., Lesovik G.B., Blatter G.,* Quantum Abacus for counting and factorizing numbers // Phys. Rev. A, 2011, 83, p. 052317.
5. *Griths R.B. and Niu C.-S.* Semiclasical Fourier Transform for Quantum Computation // Phys. Rev. Lett., 1996, 76, p. 3228.