

**Метод спектроскопии шума,
основанный на преобразовании Фурье**

Д. С. Морозова

*Национальный исследовательский университет «МИЭТ»,
г. Москва, Россия
e-mail: DoshikMorozov@yandex.ru*

Fourier transform method for noise spectroscopy

D. S. Morozova

*National Research University of Electronic Technology,
Moscow, Russia
e-mail: DoshikMorozov@yandex.ru*

Аннотация. Данная статья посвящена методу спектроскопии шума в квантовых устройствах, основанному на преобразовании Фурье. В статье описан принцип метода и приложены основные математические выкладки.

Ключевые слова: спектроскопия шума, спектр шума, преобразование Фурье, когерентность, затухание индукции, Spin Echo, когерентность, функция фильтрации.

Введение

Для стабильной и корректной работы квантовых устройств необходим анализ спектра шумов, вызывающих потерю когерентности кубитов.

Когерентность — свойство системы сохранять фазу волновой функции, т.е. способность кубита находиться в суперпозиции. Чем выше время когерентности, тем больше полезных операций можно реализовать.

Несмотря на то, что современные методы динамического подавления являются наиболее успешными, для их реализации требуется

применение больших последовательностей π -импульсов, осуществляющих поворот вектора поляризации спина на 180° , что приводит к большим техническим и финансовым затратам.

Метод спектроскопии шума, использующий преобразование Фурье (Fourier transform noise spectroscopy или FTNS) позволяет верно определить спектр шумов для всевозможных условий и при том, значительно снижает объем необходимых ресурсов.

Этот метод был впервые представлен в мае 2024 учеными из университета Нового Южного Уэльса в журнале Nature.

Описание FTNS

Данный метод предполагает использование FID или Spin Echo как основу для дальнейшего анализа спектра.

FID (Free Induction Decay) — затухание свободной индукции, процесс наблюдения затухания сигнала после прекращения внешнего воздействия, которое вызвало спин. Оно несет информацию о взаимодействии спинов друг с другом и окружающей средой и, соответственно, о временных характеристиках когерентности.

Spin Echo — явление, при котором, после повторной подачи короткого импульса в систему, направление спина меняется таким образом, чтобы рассеянные фазы резонировали, т.е. создавали «эхо». Этот эффект используется для продления времени наблюдений квантовых процессов, что очень удобно для длительных времен когерентности.

Сначала фиксируется изменение состояния кубита во времени, либо падение уровня когерентности, либо отклик системы на повторный сигнал, т.е. FID и Spin Echo соответственно.

Затем, к полученному простому временному сигналу применяется преобразование Фурье. Таким образом, получается спектр частот шумов.

Полученный спектр можно проанализировать, выявив природу и источники шумов, и предпринять оптимальные методы их устранения.

Математические выкладки

Функция когерентности $C(t)$ задается формулой:

$$C(t) = e^{-\chi(t)} \quad (1)$$

Где $\chi(t)$ — функция затухания, полученная наложением спектра шума и фильтрующей функции, учитывающей влияние импульсов на систему.

$$\chi(t) = -\ln(C(t)) = \frac{1}{4\pi} \int_{-\infty}^{\infty} d\omega S(\omega) F(\omega t) \quad (2)$$

Спектр шума $S(\omega)$ — преобразование Фурье функции равновесной временной корреляции $S(t)$ внешнего шума.

$$S(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} dt e^{i\omega t} S(t) \quad (3)$$

Функция фильтрации $F(t)$ задается в зависимости от физических составляющих системы. Она меняет знак внешних колебаний по мере поступления π -импульсов.

Далее, для большей наглядности, рассмотрим нахождение спектра шума для функции затухания свободной индукции:

$$F_{FID}(\omega t) = \frac{4}{\omega^2} \sin^2\left(\frac{\omega t}{2}\right) \quad (4)$$

Подставим выражение (4) для F_{FID} в уравнение (2):

$$\chi(t) = \frac{1}{4\pi} \int_{-\infty}^{\infty} d\omega S(\omega) \frac{4}{\omega^2} \sin^2\left(\frac{\omega t}{2}\right) \quad (5)$$

Дважды продифференцируем по времени обе части:

$$\chi''(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} d\omega S(\omega) \cos(\omega t) \quad (6)$$

К обеим частям применим преобразование Фурье:

$$S(\omega) = \sqrt{2\pi} \mathcal{F}(\chi''(t)) \quad (7)$$

При том, $S(-\omega) = S(\omega)$. Так, видно взаимно-однозначное соответствие между спектром шумов и функцией затухания индукции.

Предположим, что исходный спектр имеет вид

$$S(\omega) = A e^{-(\frac{\omega}{\sigma})^2} \quad (8)$$

Для такого спектра функция когерентности будет иметь вид:

$$\mathcal{C}(t) = \exp\left(-\frac{A}{\sigma}\left(\frac{t\sigma}{2} E\left(\frac{t\sigma}{2}\right) + \frac{e^{-\frac{t^2\sigma^2}{4}} - 1}{\sqrt{\pi}}\right)\right) \quad (9)$$

Где $E(t)$ – функция погрешности. Исходя из уравнений (6) и (9), получим:

$$\chi''(t) = \frac{A}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{t^2\sigma^2}{4}} \quad (10)$$

Подставим это значение в уравнение (7):

$$S(\omega) = \sqrt{2\pi} \mathcal{F}\left(\frac{A}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{t^2\sigma^2}{4}}\right) = A e^{-(\frac{\omega}{\sigma})^2} \quad (11)$$

Таким образом, спектр шума из уравнения (11) совпадает с изначальным из уравнения (8). Этот пример показывает корректность метода FTNS.

На рисунках 1 и 2 приведено сравнение восстановленных спектров, полученных различными динамическими методами.

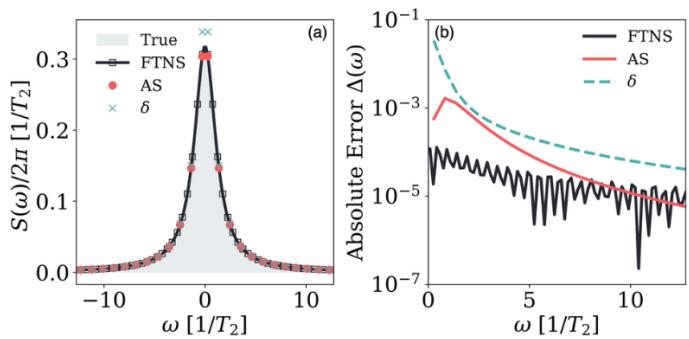


Рисунок 1 — Сравнение восстановленного простого спектра шумов между FTNS и DDNS методами

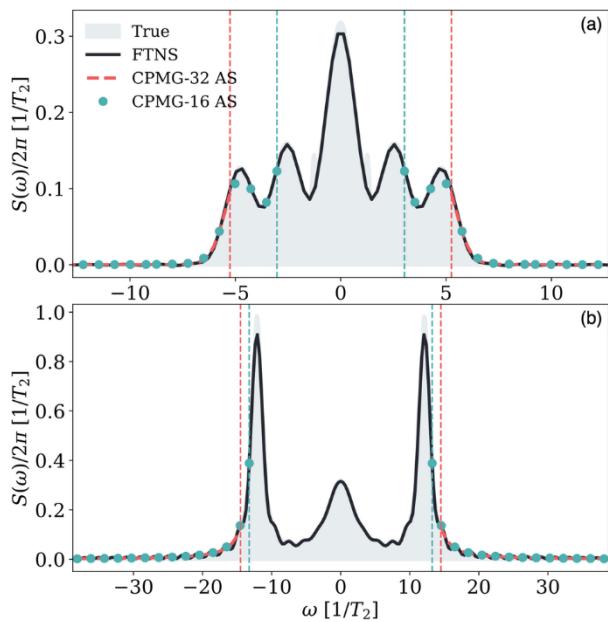


Рисунок 2 — Сравнение восстановленных сложных спектров шумов между FTNS и DDNS методами

Библиографический список

1. Arian Vezvae, Nanako Shitara, Shuo Sun & Andrés Montoya-Castillo
Fourier transform noise spectroscopy
<https://www.nature.com/articles/s41534-024-00841-w>

2. Joseph P. Hornak. "The Basics of MRI". Rochester Institute of Technology. Chapter 4: NMR SPECTROSCOPY
<https://www.cis.rit.edu/htbooks/mri/chap-4/chap-4.htm#4.1>

3. Андрей Коняев. Квантовая азбука: «Когерентность». Можно ли потревожить квантовую систему чуть-чуть, а потом вернуть все обратно?
<https://nplus1.ru/material/2016/04/12/coh>