



# КВАНТОВЫЕ РАДАРЫ

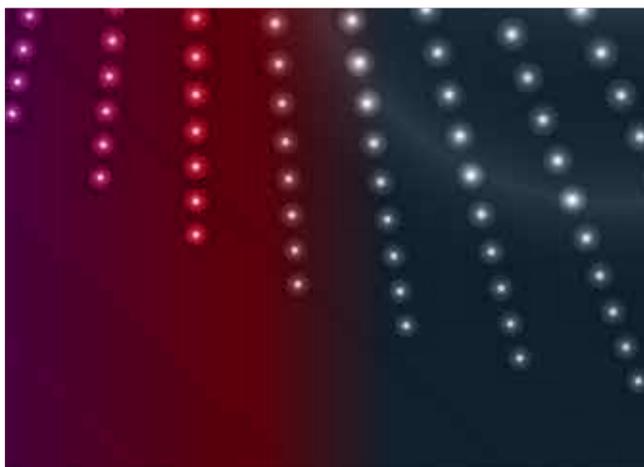


**Дмитрий Могилевцев,**  
зам. заведующего  
Центром «Квантовая  
оптика и квантовая  
информатика»  
Института физики  
НАН Беларуси,  
член-корреспондент

Первой квантовой революцией называют фундаментальный прорыв в понимании свойств вещества и излучения, произошедший в первой половине XX в. Результатом стало многое, без чего мы уже не мыслим свою повседневную жизнь: полупроводниковые технологии, принесшие нам мобильные телефоны и телевидение, компьютеры и навигаторы, лазеры, атомная энергетика и высокоточная медицинская диагностика.

**Н**ачало XXI в. ознаменовалось второй квантовой революцией, в основе которой лежит применение квантовых корреляций вещества и поля, в частности квантовой перепутанности (quantum entanglement) – явления, на заре развития квантовой механики казавшегося парадоксальным (свидетельство тому – знаменитый парадокс Эйнштейна-Подольского-Розена), приводящего к трудно вообразимому «мгновенному действию на расстоянии». Методологические трудности были разрешены в достаточной степени для того, чтобы породить и практически осуществить главный феномен: квантовую информатику, умение использовать для вычислений квантовые корреляции и получать необыкновенные результаты. Квантовые машины способны за доли секунды справиться с задачами, которые традиционные компьютеры не разрешили бы и за миллионы лет.

В числе детищ второй квантовой революции (наряду с квантовыми компьютерами, методами квантовой коммуникации и микроскопии) – новые методы диагностики удаленных объектов, так называемые квантовые радары – приборы, позволяющие улучшать возможности обнаружения и распознавания движущихся либо стационарных целей за счет неклассических свойств электромагнитного излучения, в частности квантовых корреляций.



## Рождение квантового радара

Традиционные радары – приборы, основанные на испускании направленного электромагнитного излучения, регистрации и анализе рассеянного/отраженного объектом излучения – уже давно перешли в область прикладной науки и инженерии. Основные принципы их функционирования и дизайн появились почти 100 лет назад (а прототип и вовсе был создан и продемонстрирован немцем Кристианом Хьюльсмейером в 1904 г.). Разумеется, непрерывно развиваются новые схемы и методы, улучшающие направленность пучка и контроль над его формой, используются новые материалы для антенн (разработанные недавно метаматериалы нашли широкое применение в радарной практике), создаются новые методы обработки сигналов. Примером последнего может служить так называемый фотонный радар, когда излучается сигнал по-прежнему длинноволнового диапазона, но в радарной системе обрабатывается уже оптический, модулированный на радарной частоте. Это дает возможность резко ускорить процесс обработки, генерировать импульсы недостижимой ранее спектральной ширины, и, соответственно, получить пространственное разрешение, сопоставимое с длиной волны радарного излучения.

Но все эти методы, пусть и изощренные, позволяли лишь приблизиться к хорошо известным пределам, но не превзойти их. Отношение сигнала к шуму накладывает фундаментальный предел на возможность обнаружения объектов на фоне шума, рэлеевский дифракционный предел ограничивает возможность распознавания рассеивающих объектов. Традиционные способы так или иначе подразумевают увеличение мощности для повышения отношения сигнала к шуму, использование более коротких импульсов и узконаправленных пучков для улучшения пространственного разрешения и регистрации перемещения объекта.

Потому изобретенный американским профессором Сефом Ллойдом в 2008 г. квантовый радар [1], сулящий обнаружение объектов на фоне шума при невероятно низких интенсивностях испущенного излучения, произвел ошеломляющее впечатление на радарное сообщество. Усилило эффект еще и то, что сам принцип был в достаточной мере прост и понятен: генерируется двухкомпонентное излучение, одна часть посылается к объекту, вторая сохраняется, чтобы затем интерферировать с отражен-

ным от него излучением. Результат интерференции измеряется и позволяет извлечь информацию о присутствии либо отсутствии объекта. Подобный же принцип применен, например, в шумовом радаре, разработанном еще в 50-е гг. прошлого века. Но коренным отличием предложенной Сефом Ллойдом схемы, названной «квантовой иллюминацией» было то, что посылаемая и сохраняемая части излучения были квантово коррелированными, а точнее, перепутанными. Это обещало прирост чувствительности, то есть уменьшение вероятности ошибки обнаружения объекта на фоне шума на несколько порядков при интенсивности сигнала на уровне одиночных фотонов. Она, согласно описанному протоколу [1], при использовании 2D-модового двухфотонного перепутанного состояния падает в  $D$  раз по сравнению с распределенным среди этих же мод однофотонным начальным состоянием, которое просто посылается на объект. Притом вероятность верного детектирования присутствующего объекта на фоне шума в обоих случаях одинакова. Простое увеличение  $D$ , то есть расширение частотной полосы сигнала, сулило огромный прирост отношения сигнала к шуму.

Этот поразительный факт открывал новую перспективу разработки стелс-радаров, работу которых не смогут засечь приемные устройства, предназначенные для обнаружения активных излучающих устройств. Само собой, как коммерческие предприятия, так и правительственные/военные организации заинтересовались подобными перспективами [2]. В результате научные группы, занимающиеся квантовыми радарными, получили весомую финансовую и организационную поддержку (краткий популярный обзор этого «квантово-радарного бума» можно видеть, например, в недавней работе [3]). В особенности военных подстегнуло заявление Китая в 2016 г. о создании квантового радара, способного обнаруживать самолеты, скрытые от классических радаров при помощи стелс-технологий.

## Расцвет и крах квантовой иллюминации

В начале 2010-х гг. исследовательские группы по всему миру активно занялись темой квантовых радаров на основе протокола квантовой иллюминации. Были проведены демонстрационные эксперименты в оптической области, доказавшие возможность выигрыша в отношении сигнала к шуму для квантовых перепутанных состо-



яний, началась работа по осуществлению протокола для микроволнового диапазона. На этом пути наметился существенный прогресс в разработке двухчастотной схемы. В ее рамках генерация перепутанного состояния осуществлялась в оптической области, затем электромеханический преобразователь перепутывал микроволновое и оптическое поля. Первое посылалось к объекту, а рассеянное поле преобразовывалось обратно в оптический диапазон и измерялось совместно с сохраненной частью изначального поля [4]. Также были разработаны схемы, где перепутанные состояния создавались сразу в микроволновой области при помощи сверхпроводящих параметрических усилителей, предложили возможность использования не только пространственных, но и временных корреляций. Появился ряд экспериментальных реализаций, где декларировалось многократное, и даже порядковое превосходство разработанных квантовых радарных схем над классическими [5, 3].

Декада оптимизма завершилась, когда аккуратный теоретический анализ схемы квантовой иллюминации был сопоставлен с практическими реализациями, и было оценено, сколько потребуется ресурсов для производства практически действующего радара. Для гауссовых перепутанных состояний, доступных для создания практически действующего радара, максимальная выгода по отношению сигнала к шуму при наилучшем возможном детектировании достигает всего 6 децибел. При практически удобном детектировании, когда не нужно перепутывания прошедшего и сохраненного сигнала, выгода ограничивается всего 3 децибелами. Но даже и это умеренное, но вполне ощутимое и полезное преимущество исчезает в существующих реализациях схем квантовой иллюминации [6]. К сожалению, для оригинальной схемы нужны знание о расстоянии до объекта, сохранение поляризации поля, отсутствие потерь у части поля, остающейся у экспериментатора, и высокоэффективные измерения. При усилении поля, осуществляемом при преобразовании из оптического в микроволновой диапазон, неизбежно добавляется шум, негативно сказывающийся на квантовых корреляциях. Кроме того, оказалось, что улучшение на порядок демонстрировалось при сравнении с радарными схемами, далекими от оптимальной классической модели.

В сентябре 2020 г. журнал «Сайнс» разместил заметку, название которой переводится как «Короткая странная жизнь квантового

радара», с подзаголовком «Вопреки интересам военных, квантовая механика не победит стелс-технологии» [7]. В публикации подверглось вполне обоснованному сомнению заявление Китая о создании квантового радара, и был поставлен жирный знак вопроса на принципиальной осуществимости квантового радара, по крайней мере, на основе протокола квантовой иллюминации.

## Дальнейшее развитие квантовых радаров

Разочарование в квантовой иллюминации, однако, не поставило крест на работах по нахождению и использованию квантовых преимуществ в обнаружении и распознавании удаленных объектов. В методологически схожих протоколах квантовой микроскопии и визуализации, в квантовой метрологии существование преимущества за счет квантовых корреляций и самой неклассичности излучения, которым высвечивается объект, – уже устоявшийся факт. Так, например, использование перепутанных состояний позволяет достичь предельно допустимой квантовой механикой точности, так называемого гейзенберговского предела в случае измерения фазы, а применение фоковских состояний, то есть собственных состояний оператора энергии, обеспечивает достижение гейзенберговского предела в оценке поглощения [8]. Тщательное изучение квантовой иллюминации помогло определить источник квантового преимущества и продолжить работу как над новыми квантово-радарными схемами, так и над применением наработок в области создания радара на квантовой иллюминации.

Здесь надо отметить, что квантовая перепутанность не является необходимой для достижения преимуществ в схеме квантовой иллюминации. На самом деле от объекта возвращается и попадает на детектор лишь малая часть испущенного излучения. Подобные потери неизбежно разрушают квантовую перепутанность. Было показано, что за квантовое преимущество в протоколе квантовой иллюминации отвечает другой, гораздо более устойчивый к потерям вид квантовых корреляций – «квантовый дискорд» [9].

Также было показано, что использование в квантовой иллюминации корреляций не по одной, а по нескольким степеням свободы, например по поляризации и частоте, увеличивает предельно достижимые значения выигрыша в отношении сигнала к шуму по сравнению

с оптимальной классической схемой. Этот выигрыш составляет 6 дБ на дополнительную степень свободы (хотя реализация этого преимущества требует более сложной схемы детектирования) [10]. Применение неклассических негауссовских состояний, в частности ограниченных по числу фотонов, вкуче с детекторами, различающими числа фотонов, также позволяет значительно сдвинуть предел выигрыша по отношению сигнала к шуму [11].

Неожиданные результаты дало применение квантовой иллюминации не для обнаружения объекта, а для расчета расстояния до него при использовании перепутанных по частоте состояний: выигрыш по сравнению с классическим радаром той же мощности и спектра может составлять десятки децибел [12]. Использование многомодовых перепутанных состояний, как и в квантовой микроскопии, может значительно улучшить локализацию объекта. Так,  $N$ -фотонные перепутанные состояния позволяют в  $\sqrt{N}$  раз улучшить точность определения пространственного положения точечного объекта по сравнению с  $N$ -фотонным некоррелированным состоянием [13]. Также квантовые корреляции существенно улучшают точность распознавания объекта. Так, пространственно-временные корреляции, произведенные, например, парой взаимодействующих и спонтанно испускающих квантовых диполей, могут преодолеть рэлеевский предел при определении расстояния между малыми рассеивателями [14]. Квантовые корреляции позволяют и существенно увеличить точность определения скорости объекта [15].

## Перспективы

Быстрый рост популярности и последующий крах квантовых радаров, основанных на квантовой иллюминации, несомненно, нанес значительный вред данной области квантовых технологий. Фактически, он вернул ее на уровень экспериментальных демонстраций самой возможности предсказанного теоретиками эффекта. Тем не менее экспериментаторами уже совершены уверенные первые шаги в данном направлении. Так, совсем недавно был продемонстрирован чисто микроволновой радарный прибор, действительно дающий квантовое преимущество при обнаружении объекта [16]. Микроволновые квантовые технологии быстро развиваются, и уже доступны однофотонные детекторы в данной области длин волн,

равно как и новые способы генерации неклассических состояний вкуче с малошумящими усилителями, позволяющие с оптимизмом смотреть на перспективы квантовых радаров [17].

Следует также заметить, что в Республике Беларусь, в частности в Центре «Квантовая оптика и квантовая информатика» Института физики НАН Беларуси, с 2018 г. ведутся исследования в области квантовой визуализации и сенсинга, в том числе и в сфере квантовых радаров, приведшие к ряду публикаций в высокорейтинговых физических журналах [3, 14]. Подобные исследования планируется продолжить с перспективами экспериментальной реализации. ■

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. S. Lloyd. Enhanced sensitivity of photodetection via quantum illumination / S. Lloyd // *Science*. 2008. Vol. 321. №5895. P. 1465.
2. M. Høijer, T. Hult and P. Jonsson. Quantum Radar. Quantum Radar – A survey of the science, technology and literature // <https://www.foi.se/rest-api/report/FOI-R-4854-SE>.
3. G. Slepian. Quantum Radars and Lidars: Concepts, realizations, and perspectives / G. Slepian, S. Vlasenko, D. Mogilevtsev and A. Boag // *IEEE Antennas and Propagation Magazine*. 2022. Vol. 64. №1. P. 16–26.
4. S. Barzanjeh. Microwave Quantum Illumination / S. Barzanjeh, S. Guha, C. Weedbrook, D. Vitali, J.H. Shapiro, and S. Pirandola // *Phys. Rev. Lett.* 2015. Vol. 114, P. 080503.
5. G. Sorelli. Detecting a Target With Quantum Entanglement / G. Sorelli, N. Treps, F. Grosshans and F. Boust // *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*. 2022. Vol. 37. №5. P. 68–90.
6. J.H. Shapiro. The Quantum Illumination Story / J.H. Shapiro // *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*. 2020. Vol. 35. №4. P. 8–20.
7. A. Cho. The short, strange life of quantum radar / A. Cho // *Science*. 2020. Vol. 369, №6511 P. 1556–1557.
8. M. Barbieri. Optical Quantum Metrology / M. Barbieri // *PRX Quantum* 2022. Vol. 3. P. 010202.
9. C. Weedbrook. How discord underlies the noise resilience of quantum illumination / C. Weedbrook, S. Pirandola, J. Thompson, V. Vedral, and M. Gu // *New J. Phys.* 2016. Vol. 18, №4. P. 043027.
10. A. Varadaraj Prabhu. Hyperentanglement-enhanced quantum illumination / A. Varadaraj Prabhu, B. Suri, and C.M. Chandrasheka // *Phys. Rev. A*. 2021. Vol. 103. P. 052608.
11. L. Cohen. Thresholded Quantum LIDAR: Exploiting Photon-Number-Resolving Detection / L. Cohen, E.S. Matekole, Y. Sher, D. Istrati, H.S. Eisenberg, and J.P. Dowling // *Phys. Rev. Lett.* 2019. Vol. 123. P. 203601.
12. Q. Zhuang. Ultimate Accuracy Limit of Quantum Pulse-Compression Ranging / Q. Zhuang and J.H. Shapiro // *Phys. Rev. Lett.* 2022. Vol. 128. P. 010501.
13. L. Maccone and C. Ren. Quantum Radar / L. Maccone and C. Ren // *Phys. Rev. Lett.* 2020. Vol. 124. P. 200503.
14. I. Peshko. Quantum noise radar: superresolution with quantum antennas by accessing spatiotemporal correlations / I. Peshko, D. Mogilevtsev, I. Karuseichyk, A. Mikhalychev, A.P. Nizovtsev, G. Ya. Slepian, and A. Boag // *Opt. Express* 2019. Vol. 27. P. 29217–29231.
15. M. Reichert. Quantum-enhanced Doppler lidar / M. Reichert, R. Di Candia, M.Z. Win [et al.] // *Npj. Quantum. Inf.* 2022. Vol. 8. P. 147.
16. R. Assouly. Quantum advantage in microwave quantum radar / R. Assouly, R. Dassonneville, T. Peronin [et al.] // <https://doi.org/10.1038/s41567-023-02113-4>.
17. M. Casariego. Propagating quantum microwaves: towards applications in communication and sensing / M. Casariego [et al.] // *Quantum Sci. Technol.* 2023. Vol. 8 P. 023001.