17

Измерение величины засветок в системах атмосферного квантового распределения ключей, работающих на длине волны 1550 nm в дневных условиях

© В.М. Вахрушева[1], А.Н. Климов[2], Е.А. Моисеева[3], С.Е. Широбакин[4]

[1] ООО „СФБ Лаб“,
Москва, Россия
[2] АНО „ЦРКТ“,
Москва, Россия
[3] Центр квантовых технологий физического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова,
Москва, Россия
[4] АО „МОСТКОМ“,
Рязань, Россия

e-mail: vmvakhrusheva@gmail.com

Поступила в редакцию 19.11.2024 г.
В окончательной редакции 14.01.2025 г.
Принята к публикации 23.01.2025 г.

Исследованы шумы на длине волны 1550 nm, обусловленные излучением Солнца, в системах атмосферного квантового распределения ключей в дневное время. Описана экспериментальная установка для измерения среднего числа фотонов, приходящих на однофотонный детектор за длительность строба. Предложена методика пересчета среднего числа фотонов на строб в абсолютное значение спектральной яркости на входе экспериментальной установки. В результате получены экспериментальные данные о спектральной яркости засветки, приходящей от неба и различных рассеивающих солнечное излучение вертикальных поверхностей, для г. Москвы при различных внешних условиях, таких как погода, время года и суток. Так как полученные данные не зависят от конкретных параметров экспериментальной установки, они могут быть использованы при оценке уровня внешних шумов и отношения сигнал/шум для любой приемной системы оптической связи, в том числе систем атмосферного квантового распределения ключей.

Ключевые слова: атмосферное квантовое распределение ключей, методы ограничения фоновой засветки, спектральная яркость излучения засветки.

DOI: 10.61011/OS.2025.02.59971.7360-24

Введение

Квантовое распределение ключей (КРК) — активно развивающаяся область науки и техники, имеющая непосредственное отношение к задаче защиты информации. Эта технология — единственное на сегодняшний день известное решение задачи распределения секретных ключей, для которого возможны доказательства безусловной секретности. В основе КРК лежит передача квантовых состояний отдельных фотонов от одного абонента к другому через оптически прозрачную среду.

К настоящему времени наиболее развитым направлением является создание волоконно-оптических систем КРК [1–3]. Но существует и альтернативное решение — передача квантовых состояний по открытому пространству в пределах прямой видимости между абонентами [4–7]. Данные каналы связи называются „атмосферными“, так как они соответствуют свободному распространению излучения по атмосфере. Такие линии представляют интерес как с точки зрения создания ключей между наземной станцией и спутником, так и между разнесенными местами на земной поверхности, прокладка оптического волокна между которыми по каким-либо причинам невозможна или невыгодна.

Атмосферные системы КРК (АКРК) пока не столь распространены, как волоконно-оптические. Главным образом, это обусловлено рассеянием, поглощением фотонов, турбулентностью, непредсказуемостью погодных явлений, а в космосе — сложностью и высокой стоимостью необходимого оборудования и инфраструктуры. Несмотря на указанные трудности, были продемонстрированы атмосферные квантовые каналы, стационарные [4–7] и мобильные, включающие распространение ключей на аэростаты и беспилотные летательные аппараты [8] на расстояния порядка десятков километров.

Как и в классической связи, качество КРК зависит от отношения сигнал/шум, которое напрямую связано с числом ошибок в просеянном ключе. Отношение сигнал/шум определяется как среднее количество сигнальных фотонов по отношению к количеству шумовых фотонов на импульс, принимаемых однофотонным детектором. В классических системах оптической связи отношение сигнал/шум может быть увеличено путем повышения уровня полезного сигнала. Для систем КРК

данная возможность отсутствует, так как в качестве полезного сигнала в них используется однофотонное или ослабленное когерентное излучение со среднем числом фотонов в импульсе меньше единицы. Таким образом, единственным способом обеспечения требуемого отношения сигнал/шум в системах КРК является снижение уровня шума.

Основными источниками шума в системах АКРК являются темновой счет детектора и фоновая засветка, обусловленная в первую очередь отраженным от различных поверхностей и рассеянным атмосферой излучением Солнца, а также излучением, отраженным от Луны, излучением звезд и искусственных источников. Однако в дневное время фоновые засветки вносят гораздо больший вклад в шум, чем темновой счет детектора [9]. Следовательно, при проектировании систем АКРК, работающих в дневных условиях, ставится задача ограничения фоновых засветок. Для решения этой задачи применяют следующие методы: выбор рабочей длины волны, спектральная, временная и пространственная фильтрации [9,10], а также ориентация на север, экранирование от прямого солнечного излучения посредством бленды и чернение рассеивающих поверхностей передатчика.

Традиционно для квантового канала АКРК используются длины волн в ближнем инфракрасном (ИК) диапазоне, попадающие в окна прозрачности атмосферы — 780 и 850 nm [5,7]. Это связано с применением относительно дешевых с большой квантовой эффективностью и малыми собственными шумами кремниевых однофотонных детекторов, спектральная чувствительность которых простирается до 900–1000 nm. Однако в последнее время все чаще появляются работы с длиной волны квантового канала 1550 nm [4,6,11], для которой пропускание атмосферы по сравнению с 850 nm выше. Особенно это касается систем, работающих при дневном свете, так как интенсивность солнечного излучения при 1550 nm примерно в пять раз слабее, чем при 800 nm. Кроме того, основным типом рассеяния солнечного излучения в атмосфере является рэлеевское рассеяние, интенсивность которого пропорциональна $1/\lambda^4$ и при 1550 nm составляет всего 7% от значения при 800 nm. В общей сложности интенсивность фоновых засветок на длине волны 1550 nm составляет всего 3% от засветок на 800 nm [4].

В работе [12] для реализации КРК внутри помещений предложено использовать длину волны 1370 nm, находящуюся в области поглощения молекулами воды и CO_2, что значительно снижает интенсивность внешней засветки от Солнца и не сильно увеличивает потери на небольших расстояниях. Для выбранной длины волны авторы измеряли засветки в различных условиях при использовании фильтра шириной 10 nm. В результате показано, что внутри помещения засветки от Солнца сравнимы с темновыми шумами однофотонного детектора.

Пространственная фильтрация заключается в уменьшении углового поля приемной оптической системы АКРК. Поскольку квантовый сигнал передатчика распространяется в атмосфере в виде слабо расходящегося пучка, угловое поле приемника может быть уменьшено до значений $10-100\,\mu$rad. Другим методом пространственной фильтрации является ограничение размера приемной апертуры. Минимальный размер апертуры определяется максимально допустимыми возникающими при этом потерями.

Спектральная фильтрация заключается в ограничении рабочего спектрального диапазона приемной оптической системы посредством установки узкополосных фильтров. При этом чем уже спектральная ширина фильтра, тем более жесткие требования предъявляются к стабилизации по длине волны источника излучения для квантового канала.

Помимо уменьшения влияния фоновой засветки временная фильтрация также позволяет снизить темновой счет детектора. Это достигается за счет уменьшения длительности строба — временного окна, в котором детектор чувствителен к приходящему излучению. Детектор остается в закрытом состоянии до тех пор, пока не ожидается прибытие сигнального фотона. Следовательно, для увеличения эффективности временной фильтрации требуется с высокой точностью синхронизировать передатчик и приемник квантового канала.

Таким образом, для оптимального выбора параметров фильтрации оказывается полезным провести оценку внешних условий, в которых предполагается функционирование системы АКРК. Например, в работе [11] при разработке системы КРК для трассы спутник — поверхность Земли были измерены дневные засветки от чистого неба в Германии.

Целью настоящей работы является оценка уровня фоновой засветки от неба и различных рассеивающих солнечное излучение поверхностей на длине волны 1550 nm, которая может быть использована в дальнейшем при проектировании систем АКРК. В качестве характеристики, описывающей интенсивность фоновой засветки и не зависящей от конкретных параметров системы АКРК, может быть использована спектральная яркость шумового излучения $L_{b,\lambda}$, $\mathrm{W}/(\mathrm{m}^2 \cdot \mathrm{sr}\cdot\mathrm{nm})$. Знание этой величины позволит спроектировать параметры приемной оптической системы АКРК таким образом, чтобы количество шумовых отсчетов позволило получать секретный ключ в условиях дневных засветок.

Экспериментальная установка

В качестве приемника излучения был выбран однофотонный детектор SPD-NIR производства AUREA Technology с коннектором для многомодового волокна с диаметром сердцевины $d_c = 50\,\mu$m. Многомодовое волокно обладает большими значениями диаметра сердцевины и числовой апертуры по сравнению с одномодовым, что позволяет увеличить уровень принимаемого

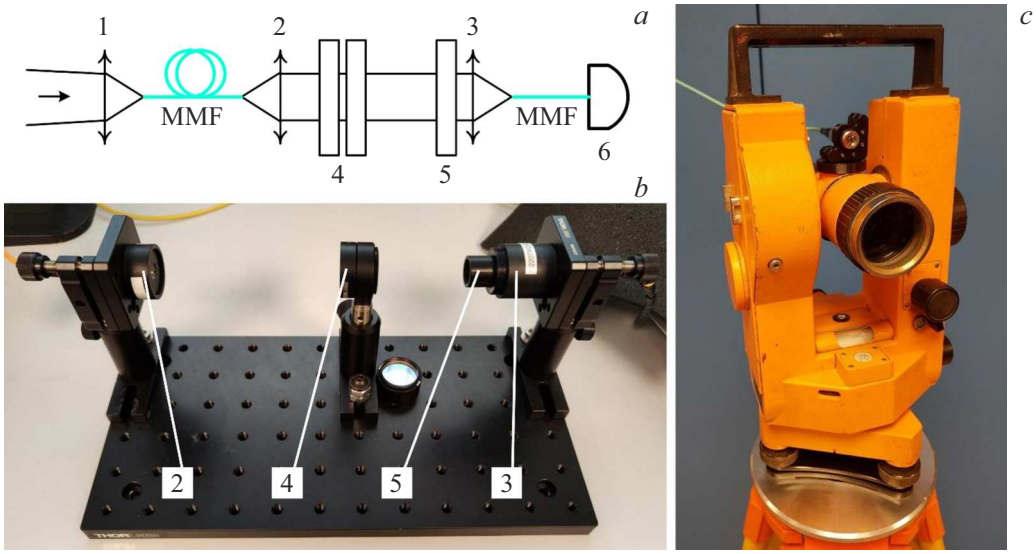

Рис. 1. (a) Схема экспериментальной установки по измерению засветок: *1, 2, 3* — коллиматоры, *4* — нейтральный фильтр, *5* — спектральный фильтр, *6* — однофотонный детектор; (b) внешний вид оптической скамьи с фильтрами; (c) приемный коллиматор F220FC-1550, установленный на теодолите.

сигнала. Схема и внешний вид установки продемонстрированы на рис. 1.

При использовании в качестве приемной апертуры непосредственно торца оптоволокна угловое поле экспериментальной установки оказывается недопустимо велико. Числовая апертура волокна OM2 составляет $NA = 0.2$. При измерении засветки от объекта, удаленного на расстояние 1 km, диаметр наблюдаемой области составит 400 m. Таким образом, становится невозможен последующий пересчет измеряемого количества фотонов в спектральную яркость. Для уменьшения углового поля приемника использовался коллиматор F220FC-1550 Thorlabs (коллиматор *1* на рис. 1, a) с диаметром апертуры $D = 6$ mm, числовой апертурой $NA = 0.24$ и фокусным расстоянием $f' = 11.29$ mm. Далее были экспериментально измерены оптические характеристики установки. Половина углового поля входного коллиматора F220FC-1550 с многомодовым волокном OM2 составила $\theta = 1.218$ mrad, эффективный размер апертуры коллиматора $D = 4.247$ mm. Таким образом, на расстоянии 1 km участок, с которого установка собирает излучение засветки, представляет собой круг диаметром около 2.5 m. Для точного нацеливания установки на исследуемый объект (источник засветки) приемный коллиматор был установлен на теодолит УОМ3 3Т2КП (рис. 1, c). Оптические оси коллиматора и зрительной трубы теодолита были отъюстированы для достижения параллельности. Для этого теодолит с коллиматором направлялись на солнечный диск, изображение которого выводилось в центр перекрестия зрительной трубы. Настройкой кинематического держателя KM05T Thorlabs изменялось направление оптической оси коллиматора до достижения максимального сигнала на однофотонном

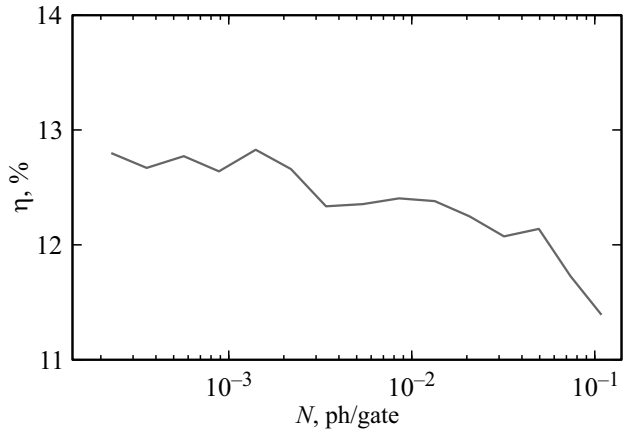

Рис. 2. Измеренная квантовая эффективность детектора SPD-NIR AUREA Technology в зависимости от регистрируемого среднего числа фотонов на строб при следующих параметрах: частота стробирования $f_{st} = 1.25$ MHz, длительность строба $\Delta t = 20$ ns, заданная квантовая эффективность $\eta = 10\%$, мертвое время $0.8\,\mu$s.

детекторе. Оценочная погрешность юстировки составила 2 mrad.

В качестве спектрального фильтра использовался фильтр открытой оптики FL051550-40 Thorlabs (*5* на рис. 1, *a, b*) с центральной длиной волны 1550 nm и шириной на полувысоте 40 nm. Данный фильтр не имеет дополнительных полос пропускания во всем диапазоне чувствительности однофотонного детектора от 900 до 1700 nm. Для работы с этим и другими фильтрами была собрана оптическая скамья (рис. 1, b) с двумя коллиматорами C220TMD-C и C397TMD-C Thorlabs, формирующими параллельный пучок. Потери на оптической

скамье с коллиматорами и спектральным фильтром составили -1.6 dB. Для уменьшения влияния фоновой засветки в помещении спектральный фильтр был установлен непосредственно перед коллиматором C220TMD-C, который через многомодовое волокно OM2 соединялся с однофотонным детектором. Детектор подключался к персональному компьютеру со специальным ПО, позволяющим вести долговременную запись регистрируемого среднего числа фотонов на строб N_b, ph/gate.

Отдельно калибровалась квантовая эффективность однофотонного детектора. График измеренной зависимости квантовой эффективности детектора SPD-NIR от регистрируемого детектором среднего числа фотонов на строб приведен на рис. 2.

Чтобы удостовериться в корректности получаемых результатов, была проведена калибровка экспериментальной установки с помощью источника света с известными спектральными характеристиками излучения. В качестве такого источника было выбрано солнечное излучение, спектральная яркость которого известна и может быть получена из данных, рассчитанных в программе SMARTS [13] для различных условий, включая дату, ориентацию и географическое положение. Таким образом, динамический диапазон экспериментальной установки должен был обеспечить возможность измерения как прямого солнечного, так и рассеянного атмосферой излучения. При этом для упрощения сопоставления результатов измерения проводились с фиксированными характеристиками однофотонного детектора. Поэтому для обеспечения требуемого динамического диапазона в экспериментальную схему были введены предварительно откалиброванные на длине волны 1550 nm нейтральные фильтры NEK01 Thorlabs (4 на рис. 1, *a, b*).

Калибровка экспериментальной установки

Результатами экспериментов по измерению фоновой засветки являются данные о среднем числе фотонов на строб, регистрируемом однофотонным детектором SPD-NIR, которое определяется как характеристиками экспериментальной установки, так и временем года и суток, погодой и состоянием атмосферы. Следовательно, необходимо осуществить пересчет измеренного среднего числа фотонов на строб N_b, ph/gate, в не зависящую от параметров регистрации величину, например, в спектральную яркость засветки $L_{b,\lambda}$, W/(m^2·sr·nm), на входной апертуре. Это позволяет применять результаты эксперимента при проектировании различных приемных оптических систем, в том числе приемных модулей АКРК. Зная спектральную яркость и оптические параметры конкретной приемной системы, можно рассчитать ожидаемое значение шума.

Оптическая мощность засветки P_b, W, регистрируемая экспериментальной установкой, может быть рассчитана

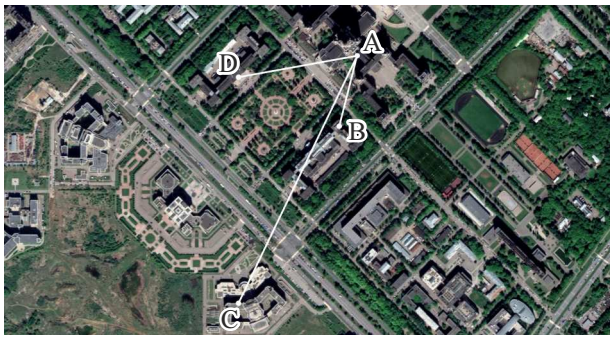

Рис. 3. Трассы для проведения экспериментов по измерению засветок: A — главное здание МГУ, B — здание физического факультета МГУ, C — здания факультета фундаментальной медицины МГУ, D — здание химического факультета МГУ.

с помощью выражения

$$P_b = L_{b,\lambda}\Omega_{fov}A_{rec}\Delta\lambda 10^{0.1L_{Rx}},$$

где Ω_{fov} — телесный угол поля зрения установки, sr; A_{rec} — эффективная площадь входной апертуры установки, m^2; $\Delta\lambda$ — ширина спектральной полосы пропускания установки, m; L_{Rx} — потери, вносимые оптическими компонентами установки, dB.

Ширина спектральной полосы пропускания установки определяется спектральной шириной фильтра FL051550-40, которая составляет 40 nm. Число детектируемых фотонов на строб связано с регистрируемой мощностью следующим образом:

$$N_b = \frac{P_b\Delta t}{hc/\lambda}\eta,$$

где Δt — длительность строба однофотонного детектора, s; λ — центральная длина волны спектрального фильтра, m; η — квантовая эффективность однофотонного детектора; $h = 6.626 \cdot 10^{-34}$ J·s — постоянная Планка; $c = 3 \cdot 10^8$ m/s — скорость света в вакууме.

С учетом выражений для телесного угла $\Omega_{fov} = \pi\theta^2$ и площади апертуры $A_{rec} = \pi D^2/4$, где θ — половина углового поля, rad, D — эффективный диаметр входной апертуры установки, m, среднее число фотонов на строб, регистрируемых детектором, равно

$$N_b = \frac{L_{b,\lambda}\pi^2(\theta D)^2\lambda\Delta\lambda\Delta t}{4hc}\eta 10^{0.1L_{Rx}}. \qquad (1)$$

Данное выражение позволяет провести теоретический расчет среднего числа фотонов на строб при известной спектральной яркости приходящего излучения и параметрах экспериментальной установки и сравнить с калибровочным значением. Калибровка установки была проведена 3 сентября 2024 года в 15:00. Для этого приемный коллиматор установки был направлен на солнечный диск. В дальнейшем все связанные с калибровкой величины будут обозначены сверху тильдой.

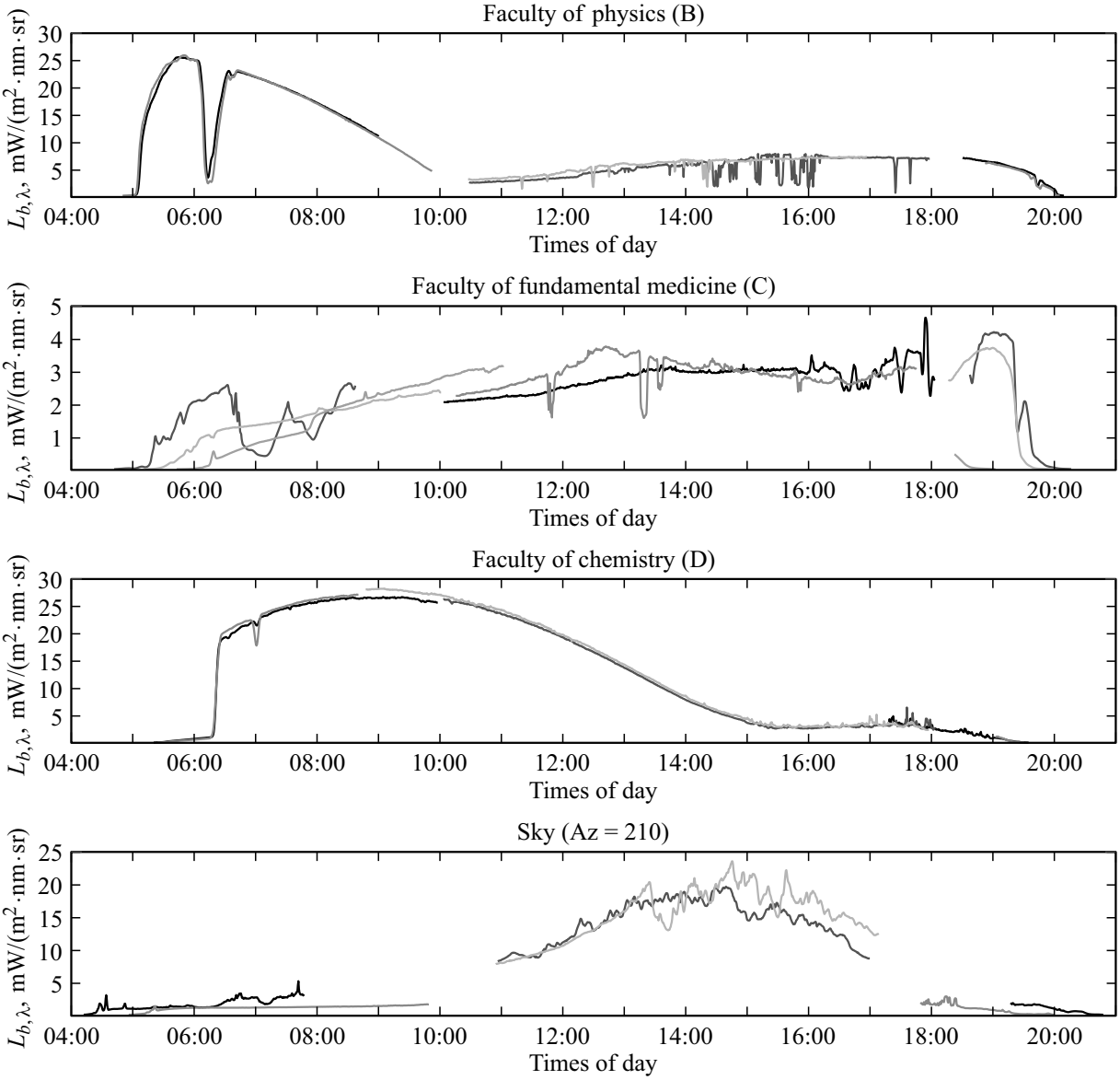

Рис. 4. Результаты измерения спектральной яркости фоновой засветки на длине волны 1550 nm с июля по сентябрь для г. Москвы при ясной и малооблачной погоде.

Среднее измеренное число фотонов на строб при установке нейтральных фильтров с суммарным показателем ослабления $\tilde{L}_{NF} = -62.55$ dB составило

$$\tilde{N}_b = 0.0171 \text{ ph/gate}.$$

По данным Гидрометцентра России [14] метеорологическая горизонтальная дальность видимости в г. Москве в это время составила 20 km. Для данных условий в программе SMARTS для $\lambda = 1550$ nm была получена спектральная облученность прямым солнечным излучением ориентированной на Солнце поверхности $E_{\text{Sun}} = 216.8$ mW/(m^2·nm). Исходя из допущения о том, что солнечный диск является ламбертовским излучателем с угловым размером $\theta_{\text{Sun}} = 18' = 4.65$ mrad, была рассчитана спектральная яркость приходящего на экспериментальную установку излучения:

$$\tilde{L}_{b,\lambda} = \frac{E_{\text{Sun}}}{\pi \cdot \sin^2 \theta_{\text{Sun}}} = 3192 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{nm} \cdot \text{sr)}.$$

Тогда с помощью выражения (1) можно получить теоретическое число фотонов засветки на строб с учетом следующих параметров экспериментальной установки: угловое поле $\theta = 1.218$ mrad, эффективный диаметр апертуры $D = 4.247$ mm, центральная длина волны $\lambda = 1550$ nm, ширина спектрального фильтра $\Delta\lambda = 40$ nm, длительность строба приемника $\Delta t = 20$ ns, квантовая эффективность приемника $\eta = 12.5\%$, потери

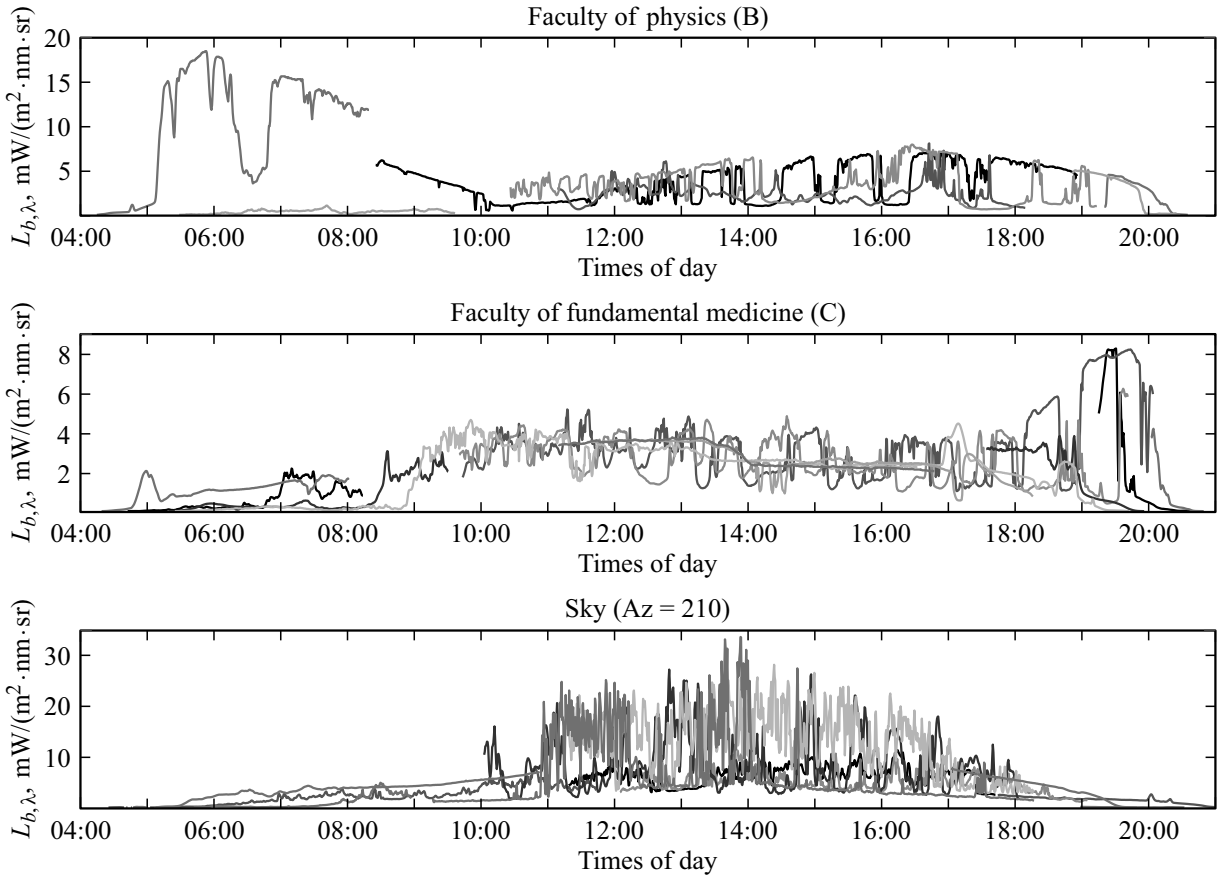

Рис. 5. Результаты измерения спектральной яркости фоновой засветки на длине волны 1550 nm с июля по сентябрь для г. Москвы при облачной погоде.

оптической системы на 1550 nm $L_{Rx} = -1.6$ dB:

$$\tilde{N}_b^{\text{theor}} = \frac{\tilde{L}_{b,\lambda}\pi^2(\theta D)^2\lambda\Delta\lambda\Delta t}{4hc}\eta 10^{0.1\left(L_{Rx}+\tilde{L}_{NF}\right)} = 0.063\,\text{ph/gate}.$$

Сравнивая полученное значение с калибровочным, можно рассчитать ошибку:

$$\frac{\tilde{N}_b^{\text{theor}} - \tilde{N}_b}{\tilde{N}_b^{\text{theor}}}100\% = 73\%.$$

Наличие ошибки связано с неучтенными потерями: в приемном коллиматоре, в многомодовом волокне длиной 50 m и на оптических соединениях. Таким образом, в выражение (1) необходимо ввести поправочный коэффициент, учитывающий несовпадение теоретических и экспериментальных данных:

$$K_1 = \frac{\tilde{N}_b}{\tilde{N}_b^{\text{theor}}} = 0.27.$$

С учетом полученных калибровочных значений для данной экспериментальной установки может быть рассчитан коэффициент для пересчета регистрируемого установкой числа фотонов в спектральную яркость засветки на входной апертуре:

$$L_{b,\lambda} = \frac{4hc}{\pi^2(\theta D)^2\lambda\Delta\lambda\Delta t\eta 10^{0.1L}K_1}N_b = K_2 N_b.$$

Раскрыв K_1, получим упрощенное выражение для определения коэффициента пересчета K_2:

$$K_2 = \frac{4hc\tilde{N}_b^{\text{theor}}}{\pi^2(\theta D)^2\lambda\Delta\lambda\Delta t\eta 10^{0.1(L_{Rx}+L_{NF})}\tilde{N}_b} = \frac{4hc\frac{\tilde{L}_{b,\lambda}\pi^2(\theta D)^2\lambda\Delta\lambda\Delta t}{4hc}\eta 10^{0.1(L_{Rx}+\tilde{L}_{NF})}}{\pi^2(\theta D)^2\lambda\Delta\lambda\Delta t\eta 10^{0.1(L_{Rx}+L_{NF})}\tilde{N}_b} = \frac{\tilde{L}_{b\lambda}}{\tilde{N}_b}10^{0.1\tilde{L}_{NF}}10^{-0.1L_{NF}}.$$

Таким образом, для данной экспериментальной установки коэффициент пересчета определяется следующим образом:

$$K_2(L_{NF}) = 103.8\cdot 10^{-0.1L_{NF}}\,\text{mW/(m}^2\cdot\text{nm}\cdot\text{sr)},$$

где $L_{NF} < 0$ — ослабление, вносимое устанавливаемыми нейтральными фильтрами, dB.

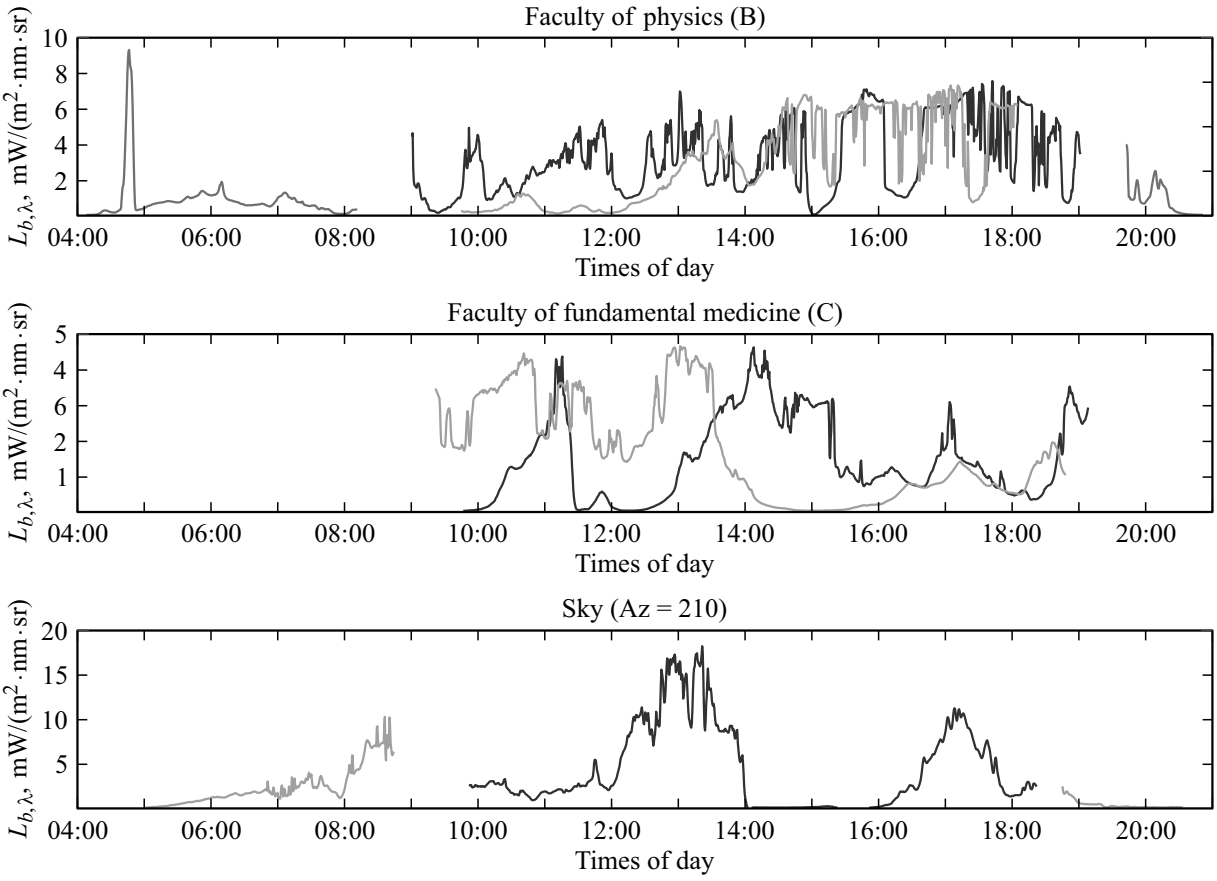

Рис. 6. Результаты измерения спектральной яркости фоновой засветки на длине волны 1550 nm с июля по сентябрь для г. Москвы при дожде.

Результаты измерений

Эксперимент по измерению фоновой засветки проводился с июля по сентябрь 2024 года для трех горизонтальных атмосферных трасс (рис. 3) длиной 200 m (AB), 750 m (AC) и 330 m (AD), а также от неба.

Экспериментальная установка была расположена в главном здании МГУ им. М.В. Ломоносова (A). Были проведены измерения фоновой засветки от зданий физического факультета (B), факультета фундаментальной медицины (C) и химического факультета (D), а также от неба над C. Сигнал засветки регистрировался экспериментальной установкой с 4:00 до 21:00. В ночное время сигнал оказывался ниже уровня собственного шума однофотонного детектора, равного $2 \cdot 10^{-5}$ ph/gate. Результаты серии измерений, пересчитанные в значения спектральной яркости приходящего на вход установки излучения, приведены на рис. 4–6. Кривые, отвечающие различным измерениям, представлены в оттенках серого.

Для физического факультета (B) наблюдалась вертикальная поверхность, ориентированная под 45° относительно направления на север. В период с 14 по 19 августа поверхность освещалась прямым солнечным излучением с 5:00 до 10:00. Снижение сигнала в 6:15 связано с падением тени на наблюдаемую область. Аналогично с 28 по 30 августа наблюдалась ориентированная под 135° на север стена химического факультета (D). Прямое солнечное излучение попадало на стену с 6:30 до 15:00. При этом максимальная спектральная яркость отраженного от данных поверхностей излучения составила 25.7 и 28 mW/(m^2·sr·nm) для физического и химического факультетов соответственно. С 10:00 для физического и с 15:00 для химического факультетов наблюдаемые поверхности находились в тени, спектральная яркость отраженного от них света была обусловлена рассеянным атмосферой излучением и составила 3–7 mW/(m^2·sr·nm). Данные значения близки к результатам, полученным для ломоносовского корпуса (C), наблюдаемая поверхность которого всегда находилась в тени за время эксперимента. При наблюдении неба над горизонтом даже в ясную погоду присутствовала легкая дымка, при этом максимальная яркость составила 23.3 mW/(m^2·sr·nm).

Сравнивая графики на рис. 4 и 5, можно сделать вывод, что увеличение облачности приводит к снижению спектральной яркости отражающей поверхности при ее освещении прямым солнечным излучением. Яркость находящейся в тени поверхности, напротив, растет, так как

увеличивается интенсивность рассеянного атмосферой излучения, что подтверждается результатами, полученными для неба. Таким образом, наличие облаков привело к увеличению яркости наблюдаемой стены ломоносовского корпуса с 4.2 mW/(m^2·sr·nm) для ясной погоды до 8.1 mW/(m^2·sr·nm) для облачной, а излучение неба возросло до 33.2 mW/(m^2·sr·nm).

В условиях кучево-дождевых облаков (рис. 6) яркость поверхностей в тени и неба оставалась на том же уровне, что и для ясной погоды. Однако во время выпадения осадков сигнал снижался до уровня шумов вне зависимости от наблюдаемой поверхности. Следовательно, можно говорить об ограничениях в работе систем АКРК, связанных с увеличением поглощения в атмосферном канале в условиях интенсивных осадков, тумана или пыльной бури.

Заключение

Создание систем АКРК — достаточно сложный процесс, который обычно проводится при неполной информации об особенностях среды распространения оптического излучения. Поэтому на начальном этапе их проектирования необходимо учитывать характерные для предполагаемой трассы поглощение, рассеяние, турбулентность атмосферы и, конечно, засветки от солнечного излучения, если АКРК разрабатывается для работы в дневных условиях.

В работе представлена экспериментальная установка и методика, позволяющая измерять абсолютное значение спектральной яркости излучения засветки для предполагаемой трассы в выбранном спектральном диапазоне, а также проведены ее измерения на длине волны 1550 nm для горизонтальных трасс в условиях г. Москвы. Полученные данные о спектральной яркости излучения засветки с помощью выражения (1) позволяют провести оценку количества фотонов засветки, регистрируемых системой АКРК с известными параметрами, такими как эффективный размер входной апертуры, угловое поле, ширина спектрального фильтра и длительность строба приемника; а при известном уровне полезного сигнала — определить отношение сигнал/шум при различных внешних условиях.

Благодарности

Работа выполнена в рамках совместных исследований и при поддержке АО „ИнфоТеКС“, при использовании оборудования „Комплекс квантовой сети МГУ“из Программы развития Московского университета.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

[1] C.X. Zhang, D. Wu, P.W. Cui, J.C. Ma, Y. Wang, J.M.An. Chinese Phys. B, **32** (12), 124207 (2023). DOI: 10.1088/1674-1056/acfd16
[2] J. Lai, F. Yao, J. Wang, M. Zhang, F. Li, W. Zhao, H. Zhang. Entropy, **25** (4), 627 (2023). DOI: 10.3390/e25040627
[3] J. Wang, B.A. Huberman. Wirel. Commun. Mobile Comput., 2022, 9927255 (2022). DOI: 10.1155/2022/9927255
[4] S.K. Liao, H.L. Yong, C. Liu, G.L. Shentu, D.D. Li, J. Lin, H. Dai, S.Q. Zhao, B. Li, J.Y. Guan, W. Chen, Y.H. Gong, Y. Li, Z.H. Lin, G.S. Pan, J.S. Pelc, M.M. Fejer, W.Z. Zhang, W.Y. Liu, J. Yin, J.G. Ren, X.B. Wang, Q. Zhang, C.Z. Peng, J.W. Pan. Nature Photon., **11**, 509 (2017). DOI: 10.1038/nphoton.2017.116
[5] A. Kržič, S. Sharma, C. Spiess, U. Chandrashekara, S. Töpfer, G. Sauer, L. del Campo, T. Kopf, S. Petscharnig, T. Grafenauer, R. Lieger, B. Ömer, C. Pacher, R. Berlich, T. Peschel, C. Damm, S. Risse, M. Goy, D. Rieländer, A. Tünnermann, F. Steinlechner. npj Quantum Inf., **9**, 95 (2023). DOI: 10.1038/s41534-023-00754-0
[6] W.Q. Cai, Y. Li, B. Li, J.G. Ren, S.K. Liao, Y. Cao, L. Zhang, M. Yang, J.C. Wu, Y.H. Li, W.Y. Liu, J. Yin, C.Z. Wang, W.B. Luo, B. Jin, C.L. Lv, H. Li, L. You, R. Shu, G.S. Pan, Q. Zhang, N.L. Liu, X.B. Wang, J.Y. Wang, C.Z. Peng, J.W. Pan. Optica, **11** (5), 647 (2024). DOI: 10.1364/OPTICA.511000
[7] J. Tepper, N. Hellerhoff, A. Comin. *arXiv:2405.04113v1* [Электронный ресурс]. URL: https://arxiv.org/abs/2405.04113
[8] Y. Xue, W. Chen, S. Wang, Z. Yin, L. Shi, Z. Han. Chin. Opt. Lett., **19** (12), 122702 (2021). DOI: 10.3788/COL202119.122702
[9] E.L. Miao, Z.F. Han, S.S. Gong, T. Zhang, D.S. Diao, G.C. Guo. New J. Phys., **7** (1), 215 (2005). DOI: 10.1088/1367-2630/7/1/215
[10] A. Scriminich, G. Foletto, F. Picciariello, A. Stanco, G. Vallone, P. Villoresi, F. Vedovato. Quantum Sci. Technol., **7** (4), 045029 (2022). DOI: 10.1088/2058-9565/ac8760
[11] S. Häusler, D. Orsucci, L. Vollmann, E. Peev, F. Moll. Opt. Eng., **63** (4), 041211 (2024). DOI: 10.1117/1.OE.63.4.041211
[12] V. Lee, A. Schreier, G. Faulkner, D. O'Brien. Proc. SPIE, **12335**, 71 (2023). DOI: 10.1117/12.2645135
[13] C. Gueymard. SMARTS2, *Simple Model of the Atmospheric Radiative Transfer of Sunshine: Algorithms and Performance Assessment*, FSEC-PF-270-95 (Florida Solar Energy Center, Cocoa, 1995).
[14] Гидрометцентр России. Архив фактической погоды [Электронный ресурс]. URL: https://meteoinfo.ru/archive-pogoda/russia