

- 1 Контактные данные автора, ответственного за связь с редакцией
- 2 Фадеев Максим Алексеевич
- 3 Университет ИТМО, 197101, г. Санкт-Петербург, Кронверкский пр., 49
- 4 мобильный телефон +7 999 206-94-13
- 5 e-mail: wertsam2011@gmail.com

7 Гетеродинное детектирование для системы квантового распре-
8 деления ключа на боковых частотах

9 М.А. Фадеев^{1,3}, П.А. Морозова¹, С.В. Смирнов^{1,2}, А.Е. Иванова^{1,2},

10 С.М. Кынев^{1,2}, В.В. Чистяков¹

11 ¹ Университет ИТМО 197101, Россия, г. Санкт-Петербург, Кронверкский пр, д. 49;

12 ²ООО «СМАРТС-Кванттелеком» 199178, Россия, г. Санкт-Петербург, В.О., 6 линия
13 д.59, корп. 1, лит. Б;

14 ³ Российский Квантовый Центр 21205, г. Москва, Территория Инновационного Цен-
15 тра «Сколково», Большой бульвар, д. 30, стр. 1

16 Одним из способов улучшения характеристик системы квантовой коммуникации на
17 боковых частотах является изменение принципов детектирования. В настоящей статье
18 в качестве альтернативы детектору одиночных фотонов, рассматривается гетеродинное
19 детектирование с использованием балансного фотодетектора. В рамках работы реали-
20 зована схема гетеродинного детектирования для системы квантового распределения
21 ключа на боковых частотах, продемонстрирована экспериментальная работа данной
22 схемы и проведены измерения фазового сдвига, которым возможно кодировать инфор-
23 мацию.

24 Heterodyne detection for subcarrier-wave quantum key distribution 25 system

26 *M. A. Fadeev, R. K. Goncharov, P. A. Morozova, S. V. Smirnov, A. E. Ivanova S. M.*
27 *Kynev, V. V. Chistyakov*

28 One way to improve the performance of a quantum communication system at side
29 frequencies is to change the detection principles. In this article, as an alternative to a single
30 photon detector, heterodyne detection using a balanced photodetector is considered. As part
31 of the work, a heterodyne detection circuit was implemented for a quantum key distribution
32 system at side frequencies; the experimental operation of this circuit was demonstrated, and
33 measurements of the phase shift, which can be used to encode information, were carried out.

34

35 Здесь желательно указать перевод специальных терминов, часто использующихся
36 в статье, на английский язык:

37 квантовое распределение ключа - quantum key distribution гетеродинное детектирова-
38 ние - heterodyne detection боковые частоты - subcarrier waves балансный детектор -
39 balanced detector КРКБЧ - SCWQKD Гомодинное детектирование - homodyne detection
40 Локальный осциллятор - Local Oscillator Быстрое Преобразование Фурье - Fast Fourier
41 Transform Дискретные переменные - Discrete Variables Непрерывные переменны - Continuous
42 Variables КРКНП - CV-QKD

43 ВВЕДЕНИЕ

44 Современные системы передачи данных невозможны без систем шифрования и выра-
45 ботки ключей. Однако развитие квантовых компьютеров является существенным вызо-
46 вом для существующих протоколов шифрования [1]. Одним из решений этой проблемы
47 являются системы квантового распределения ключа (КРК), построенные на физиче-
48 ских принципах защиты информации. Криптографическая стойкость КРК обеспечива-
49 ется за счет использования одиночных фотонов или ослабленного (до уровня кванто-
50 вого сигнала) когерентного излучения в качестве носителей информации и достигается
51 следующими свойствами: теорема о запрете клонирования, разрушение фотона при из-
52 мерении [2, 3, 4]. На практике в системах КРК чаще применяются так называемые
53 ослабленные когерентные состояния света из-за сложностей реализации однофотонных
54 схем [5]. Тем не менее, для таких систем также обоснована криптографическая стой-
55 кость [6, 7, 8].

56 В мировой литературе существует следующая классификация протоколов КРК: на
57 дискретных переменных [4], где в блоке получателя используются детекторы одиноч-
58 ных фотонов на основе сверхпроводников или лавинных диодов; и на непрерывных
59 переменных [9, 10], где на приемной стороне приготовленный сигнал смешивается на
60 сбалансированном светоделителе с так называемым локальным осциллятором — мощ-
61 ным опорным излучением. Результат интерференции этих сигналов будет зависеть от
62 разности фаз между локальным осциллятором и информационным сигналом. Резуль-
63 тат регистрируется с помощью балансного детектора, который состоит из классических
64 фотодиодов и вычитающей схемы, поэтому выходные фототоки вычитаются для умень-
65 шения шумов и увеличения чувствительности.

66 В настоящей работе рассматривается система КРК на непрерывных переменных с
67 передачей по волоконному каналу локального осциллятора совместно с информацион-

68 ным сигналом. Разностная частота (между локальным осциллятором и сигналом) на-
69 блюдается на выходе балансного детектора и в случае кодирования информации в боко-
70 вых частотах модулированного излучения является модулирующей частотой электро-
71 оптического модулятора в блоке отправителя. Одним из подходов к реализации прото-
72 колов КРК является КРК на боковых частотах (КРКБЧ) [11, 12, 13], конвенциональная
73 схема которого отражена на рисунке 1. Данный подход позволяет генерировать ослаб-
74 ленные когерентные состояния на боковых частотах, которые появляются в оптическом
75 спектре после фазовой модуляции синусоидальным сигналом. Такая реализация позво-
76 ляет более эффективно использовать технику частотного мультиплексирования (Dense
77 Wavelength Division Multiplexing) [14], а также успешно компенсировать поляризаци-
78 онные искажения линии пассивным методом. [15, 16] Дополнительно существует воз-
79 можность производить сеансы квантовой коммуникации по открытому пространству,
80 используя КРКБЧ [17].

81 Типичный протокол КРКБЧ работает следующим образом. Лазерное излучение от
82 непрерывного лазера попадает на фазовый модулятор, на радиочастотный вход кото-
83 рого подается синусоидальный сигнал. Для генерации модулирующего сигнала и вне-
84 сения фазового сдвига в него используется квадратурный модулятор. В результате на
85 выходе оптического фазового модулятора в оптическом спектре формируется много-
86 модовый (в смысле частотных мод) сигнал. Рассматривают три значимые моды: моду
87 на центральной частоте, являющуюся несущей модой. две боковые моды, отстоящие
88 от несущей, которые соответствуют сумме и разности частот лазера и модулирующего
89 сигнала. Остальными же модами пренебрегают вследствие малой глубины модуляции.
90 Полученный спектр излучения ослабляется с помощью перестраиваемого аттенюатора
91 так, чтобы мощность боковых компонент была на уровне квантового сигнала.

92 После этого полученное излучение передается по оптическому волокну на сторону

93 приемника. На приемной стороне подготовленное Алисой состояние подвергается по-
94 вторной модуляции на той же частоте, что и на стороне отправителя. При этом Боб
95 вносит в свой модулирующий сигнал фазовый сдвиг. В результате повторной модуля-
96 ции на боковых частотах наблюдается интерференция, которая зависит от разности
97 фаз, выбранных Алисой и Бобом. Далее установлен спектральный фильтр на основе
98 Брэгговской решетки, который отражает сигнал на несущей частоте, поскольку он не
99 несет информации, а боковые компоненты проходят без изменений. Регистрация резуль-
100 тата интерференции происходит с помощью детектора одиночных фотонов. Количество
101 отсчетов, формируемых детектором, будет зависеть от результата интерференции.

102 Однако описанная выше схема обладает следующими недостатками: необходимость
103 согласования базисов измерений состояния фотонов, низкая эффективность детектора
104 одиночных фотонов и необходимость его охлаждения до температур порядка -40°C .

105 Ограничения системы КРК с детектором одиночных фотонов на основе лавинного
106 фотодиода возможно преодолеть, используя концепцию КРК на непрерывных пере-
107 мнных (КРКНП) и когерентное детектирование, которое основано на использовании
108 балансного детектора для регистрации излучения. В литературе уже было предложено
109 несколько вариантов реализации [18, 19], тем не менее такие схемы сталкиваются со
110 сложностями по части экспериментальной схемы.

111 1 Гетеродинное детектирование в системе квантовой 112 коммуникации на боковых частотах

113 Одним из методов реализации когерентного приема является гетеродинное детектиро-
114 вание. Данный метод изначально был предложен в радиотехнике для приема высокоча-
115 стотных модулированных сигналов. Суть данного детектирования в переносе частоты

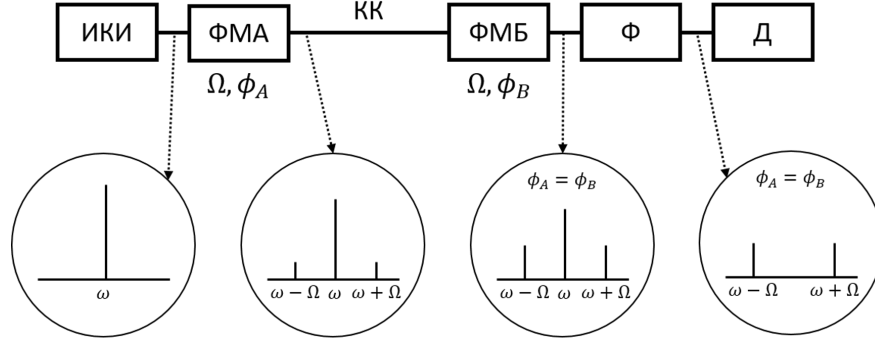


Рис. 1: Оптическая схема (упрощенная) системы КРКБЧ. Источник когерентного излучения ИКИ испускает слабый монохроматический свет (сигнал), в спектре которого после фазовой модуляции в электрооптическом модуляторе ФМА, к которому применен осциллирующий электрический сигнал с частотой Ω порядка нескольких ГГц и фазой ϕ_A , появляются боковые частоты (на схеме показаны только первые боковые частоты). Далее модулированный сигнал проходит через квантовый канал КК (оптическое волокно), где претерпевает затухание. После сигнал проходит второй электрооптический модулятор, к которому также применен осциллирующий электрический сигнал с частотой Ω и фазой ϕ_B . В зависимости от разности фаз между ϕ_A и ϕ_B амплитуды боковых мод увеличиваются (забирая часть энергии с центральной частоты в случае $\phi_A = \phi_B$) или уменьшаются (энергия перетекает на центральную частоту). Узкополосный фильтр Φ пропускает только боковые частоты (и малую часть центральной частоты), далее происходит регистрация сигнала с помощью детектора одиночных фотонов.

116 из полосы высоких частот в полосу более низких частот, где обработка и усиление сиг-
 117 налов упрощены [20, 21, 22]. Достигается это за счет интерференции сигналов: опорного
 118 (локального осциллятора) и принятого информационного на нелинейном элементе [23].
 119 В результате принятый сигнал переносится в полосу более низких частот, по сравнению
 120 с частотой исходного сигнала. При этом информация, закодированная в фазе исходного
 121 сигнала, сохраняется.

122 В настоящей работе по аналогии с [18, 19] рассматривается аналог такого подхода

123 в контексте КРКБЧ. Тем не менее, как описано выше, предыдущие варианты сложно
124 реализовать на практике. Особенно это касается гетеродинного детектирования из [19],
125 который так и не был полноценно реализован. Следует отметить, что в работе [24],
126 несмотря на общее название, рассматривается аналог гомодинного детектирования с
127 регистрацией только одной квадратурной компоненты. Представленную там схему сле-
128 дует называть аналогом по той причине, что в качестве локального осциллятора там
129 используется энергия, перенесенная с несущей моды в боковые в результате повторной
130 модуляции. Теоретическое описание схемы было приведено в работе [25], а в работе
131 [26] на примере протокола GG02 было показано падение эффективности относительно
132 конвенционального гомодинирования.

133 В настоящей же работе осуществляется гетеродинированием с детектированием на
134 радиочастоте, что позволяет регистрировать сразу две квадратурные компоненты без
135 необходимости использования двух балансных детекторов. Это можно рассматривать
136 как альтернативный подход в контексте когерентного детектирования для систем кван-
137 товых коммуникаций на боковых частотах.

138 Протокол работает следующим образом:

- 139 1. Алиса готовит квантовые состояния, кодируя информацию в фазовый свиг излу-
140 чения на боковых частотах ослабленного лазерного излучения, и передает их.
- 141 2. Боб измеряет пришедшие квантовые состояния с помощью гетеродинного детек-
142 тирования.
- 143 3. Выходной сигнал балансного детектора оцифровывается и обрабатывается с по-
144 мощью алгоритма Быстрого Преобразования Фурье.
- 145 4. Измеряется частота и фаза нужной гармоники из полученного мгновенного спек-
146 тра.

147 5. Оценивается соотношение сигнал/шум.

148 6. Проводится процедура исправления ошибок с помощью соответствующих кодов.

149 В конечном счете, оценивается т.н. просеянный ключ без учета присутствия нару-
150 шителя в канале. Т.е. процедура усиления стойкости не выполняется и оставлена на
151 будущие работы с полноценным доказательством стойкости.

152 2 Математическая модель гетеродинного приема для 153 системы квантовой коммуникации на боковых ча- 154 стотах

155 Излучение лазера может быть представлено следующим образом:

$$F(t) = A_0 * \sin(\omega_0 t + \phi_0), \quad (1)$$

156 где A_0 – амплитуда сигнала, ω_0 – частота лазерного излучения, ϕ_0 – начальная фаза
157 излучения. Модулирующий сигнал:

$$S(t) = (1 + m \sin(\Omega t + \phi(t))), \quad (2)$$

158 где m – индекс модуляции, Ω – частота модуляции, $\phi(t)$ – вносимая модуляция.

159 Лазерное излучение после модуляции выглядит следующим образом:

$$\begin{aligned} F_s(t) = F(t) * S(t) = A_0 * \sin(\omega_0 t + \phi_0) + \frac{A_0 * m}{2} * (\cos((\omega_0 + \Omega)t + (\phi_0 + \phi(t))) - \\ - \frac{A_0 * m}{2} * (\cos((\omega_0 - \Omega)t + (\phi_0 - \phi(t)))), \end{aligned} \quad (3)$$

160 Результат квадратичного детектирования сигнала, полученного в выражении (3)

161 будет выглядеть следующим образом:

$$\begin{aligned}
F_d(t) &= F(t)^2 * S(t)^2 = (A_0 * \sin(\omega_0 t + \phi_0))^2 * (1 + m * \sin(\Omega t + \phi_0 + \phi(t)))^2 = \\
&= \frac{1}{8} \left\{ 4A_0^2 + 2A_0^2 * m^2 - 4A_0^2 \cos(2\omega t + 2\phi_0) - 2A_0^2 * m^2 \cos(2\omega t + 2\phi_0) - \right. \\
&\quad - 2A_0^2 * m^2 \cos(2\Omega t + 2\phi(t)) + A_0^2 * m^2 \cos(2\omega t - 2\Omega t + 2\phi_0 - 2\phi(t)) + \\
&\quad + A_0^2 * m^2 \cos(2\omega t + 2\Omega t + 2\phi_0 + 2\phi(t)) + 8A_0^2 m \sin(\Omega t + 2\phi(t)) + \\
&\quad \left. + 4A_0^2 m \sin(2\omega t - \Omega t + 2\phi_0 - \phi(t)) - 4A_0^2 m \sin(2\omega t + \Omega t + 2\phi_0 + \phi(t)) \right\}, \quad (4)
\end{aligned}$$

162 В результате ток, протекающий через фотодиод, будет определяться выражением:

$$I = R(\lambda) G C F_d, \quad (5)$$

163 где $R(\lambda)$ – спектральная чувствительность фотодиода, G – электрическое усиление ба-
164 лансного детектора, C – отношение апертуры волокна к размеру чувствительной пло-
165 щадки фотодетектора.

166 В случае проводимого эксперимента единственная гармоника, которая лежит в по-
167 лосе пропускания балансного детектора – это $A_0^2 m * \sin(\Omega t + \phi(t))$. Остальные же гар-
168 моники не попадают в полосу пропускания и будут проявляться в виде постоянной
169 составляющей, которая отфильтровывается перед первым усилителем.

170 3 Экспериментальная реализация гетеродинного при- 171 ема для системы квантовой коммуникации на боко- 172 вых частотах

173 Схема экспериментальной установки (см. рисунок 2). Она состоит из лазера Teraxion
174 PureSpectrum со следующими параметрами: центральная длина волны 1550 нм, ширина
175 полосы излучения менее 1 МГц, излучаемая мощность до 40 мВт. После него установ-
176 лен светоделитель с 1 входом и 2 выходами, излучение между которыми разделяется

177 50 на 50. Один из выходов подключен к фазовому модулятору производства EOSpace
178 со следующими характеристиками: вносимые потери 4 дБ, полоса пропускания 20 ГГц,
179 рабочая длина волны 1550 нм. Второй же выход светоделителя использовался в каче-
180 стве контрольного для измерения выходной мощности. В качестве генератора сигнала
181 использовался генератор Tektronix AFG3022C. Параметры модулирующего сигнала:
182 Частота сигнала 100 МГц, его амплитуда 0.8 В со смещением на 1 В, вносимый фазовый
183 свдиг от 0 до 360 градусов, индекс модуляции при этом составлял 0.05. В результате
184 мощность на боковых частотах составляла 200 нВт, во всем спектре - 40 мкВт. Модули-
185 рованный сигнал лазера, в котором наблюдаются 3 гармоники: несущая и две боковые
186 частоты, попадает на светоделитель с 2 входами и 2 выходами. Один из входов не
187 использовался. Сигнал между выходными портами делится пополам и попадают на ба-
188 лансный детектор. Данный детектор обладает следующими характеристиками: полоса
189 пропускания 200 МГц, чувствительность фотодиодов 0,7 А/Вт, коэффициент усиления
190 $4 \cdot 10^3$

191 В качестве измерительного оборудования выступал осциллограф Tektonix DPO70604C
192 с полосой пропускания 6 ГГц.

193 4 Результаты проведенного эксперимента

194 На рисунках 3 и 4 представлены осциллограммы на выходе балансного детектора. На
195 рисунке 3 отображается синусоидальный сигнал на частоте модуляции в 100 МГц с
196 фазовым сдвигом равным 0 градусов. Данный сигнал необходимо фильтровать от соб-
197 ственных шумов детектора и шумов от прохождения волоконной линии связи.

198 Для этого лучше всего подойдет полосовой фильтр, центральная частота которо-
199 го будет согласована с частотой модуляции. На рисунке 4 отображен синусоидальный
200 сигнал, который был отфильтрован с помощью цифрового фильтра для устранения

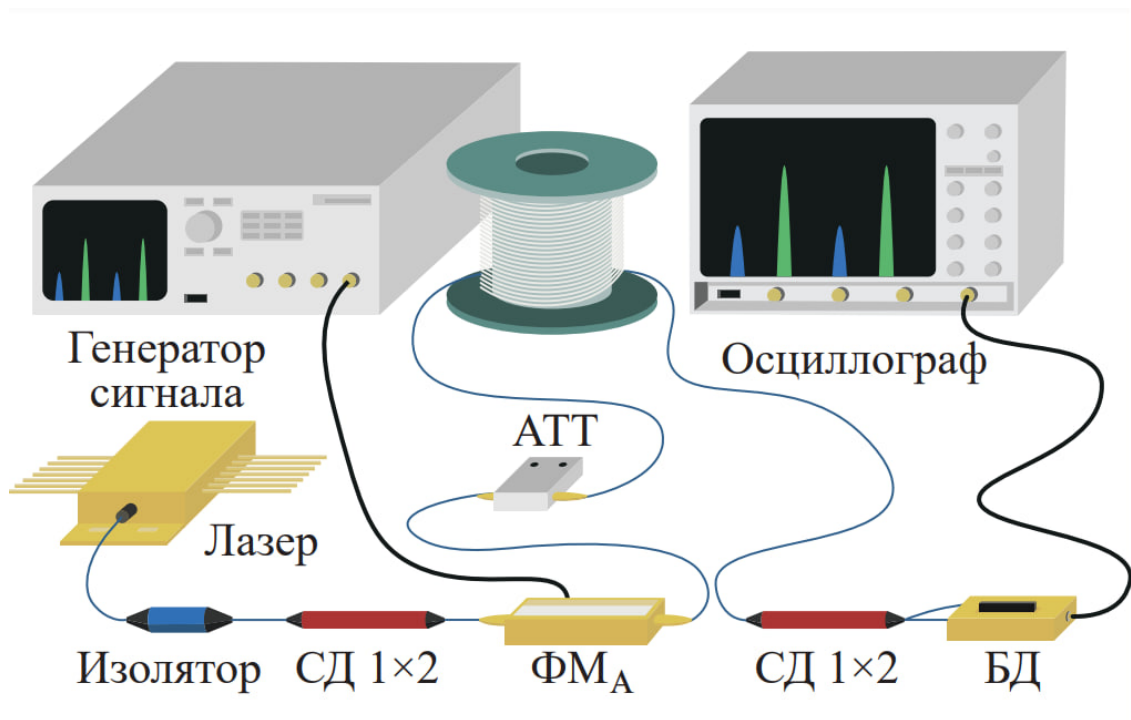


Рис. 2: Схема эксперимента гетеродинного приема

шумов. Частота сигнала на выходе балансного детектора равна частоте модуляции и несет в себе фазовый сдвиг, который кодируется на стороне отправителя. На рисунке 5 отображен спектр полученного сигнала. Она получена путем применением Быстрого Преобразования Фурье (БПФ) к данным с осциллографа, отображенных на рисунке 3. В результате были построены амплитудно-частотный спектр сигнала на выходе балансного детектора, он отображен на рисунке 5.

Как можно увидеть, в спектре наблюдается только одна гармоника на частоте модуляции. Для передачи информации в сигнал модуляции вносились фазовые сдвиги от 0 до 360 градусов с шагом 90, что соответствует QPSK типу модуляции. Результат измерений представлен на рисунке 6. Эти результаты получены с помощью БПФ, примененного к набору измерений для каждого фазового сдвига. В результате был получен фазово-частотный и амплитудно-частотный спектр, из которых извлекалась фаза и амплитуда гармоники соответственно. Дополнительно все амплитуды сигналов были нормированы. В результате получается набор сдвигов фаз, которым соответствует

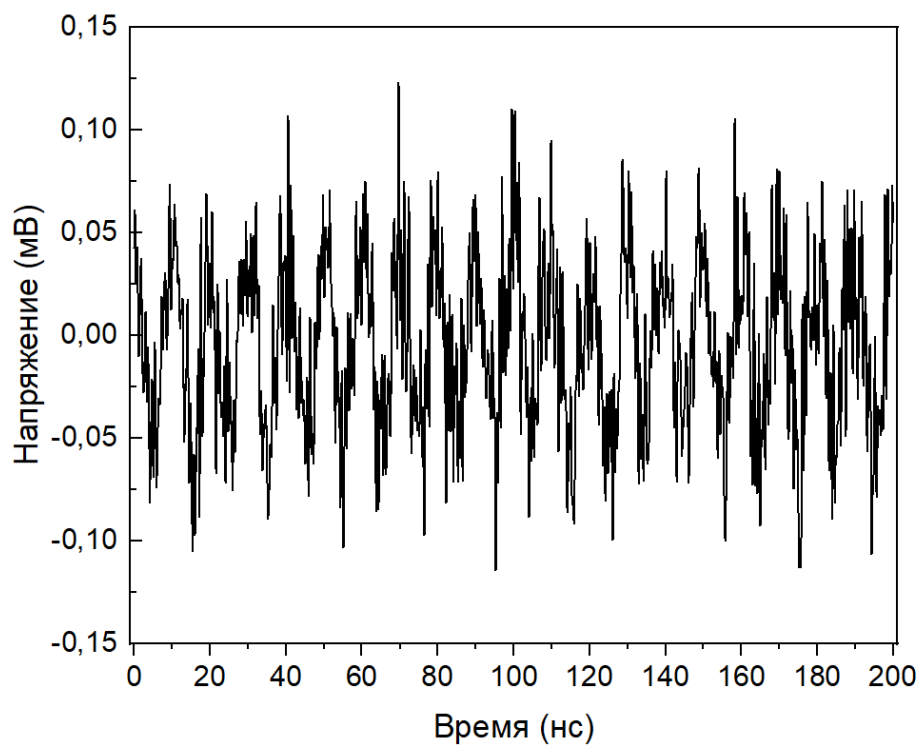


Рис. 3: Осциллограмма выхода балансного детектора без фильтрации

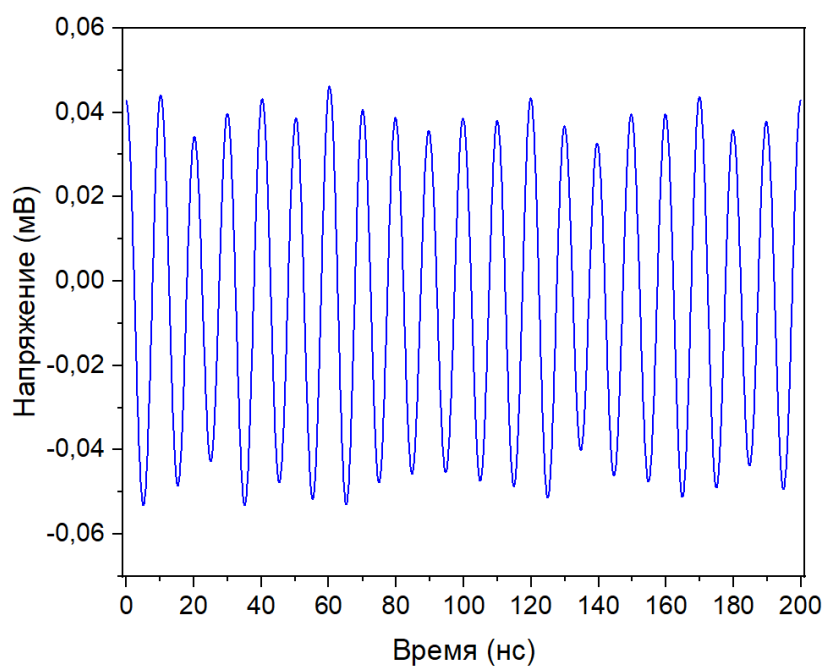


Рис. 4: Осциллограмма выхода балансного детектора после фильтрации

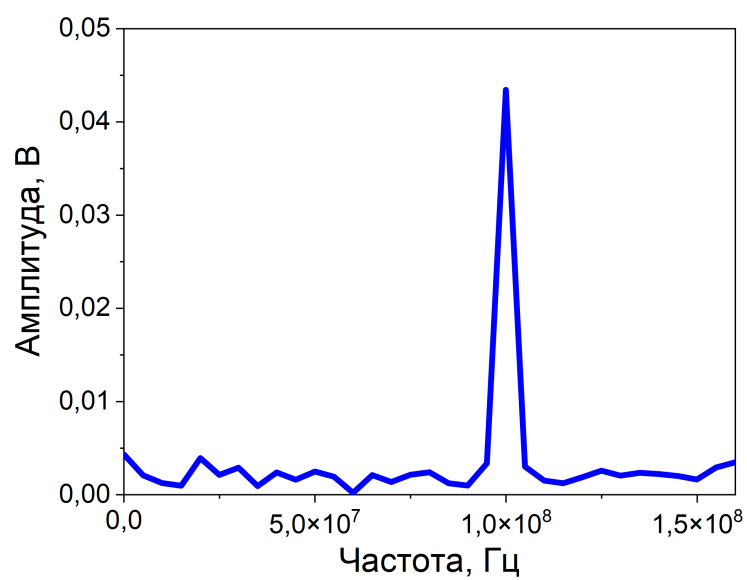


Рис. 5: Спектр сигнала на выходе балансного детектора

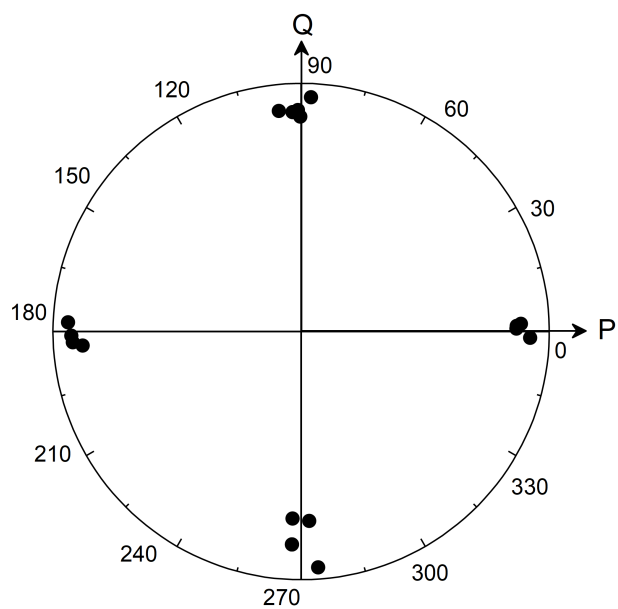


Рис. 6: Измеренные значения фазовых сдвигов

двухбитовое значение информации [00, 01, 10, 11], передаваемое излучением на сторону
 приемника.

217 5 Заключение

218 Используя локальный осциллятор, переданный вместе с информационным сигналом,
219 возможно детектировать информацию, закодированную в фазовом сдвиге, не прибегая
220 к повторной модуляции. такой способ детектирования позволяет переносить сигнал с
221 любым типом модуляции из оптической полосы частот в радиочастотную, где методы
222 ее демодуляции отработаны и упрощены, что может существенно улучшить характе-
223 ристики систем КРК и повысить их устойчивость к определенным типам атак. При
224 регистрации непосредственно слабых когерентных состояний форма сигнала, сформир-
225 рованного на балансном детекторе не изменится, однако существенно уменьшается его
226 амплитуда, что потребует дополнительной постобработки для выделения сигнала из
227 шумов, помимо предложенной в нашей работе цифровой фильтрации. Анализ в тер-
228 минах квантовой оптики описан в работе [27], а работа [19] подтверждает сходимость
229 моделей по результатам. Современные системы с гетеродинным детектированием поз-
230 воляют передавать информацию на расстояния до 100 км, что позволит улучшить за-
231 щитенность передаваемых объемов данных. Для данного эксперимента удалось рас-
232 пределить ключ на расстояние в 10 км при потерях 2 дБ. Масштабируемость данного
233 эксперимента доказана предыдущими исследованиями. Это позволяет сделать вывод о
234 том, что эффективность данного протокола будет ниже на 10 процентов относительно
235 конвенциональных систем КРКНП, что будет компенсироваться гибкостью протокола и
236 дополнительными возможностями.

237 6 Благодарности

238 Авторы статьи выражают благодарность Гончарову Роману Константиновичу за ак-
239 тивные консультации по работе. Исследование выполнено за счет гранта Российского

240 научного фонда (проект № 24-29-00786).

241 Список литературы

- 242 [1] T. Folger, The quantum hack, Scientific American 314 (2) (2016) 48–55.
- 243 [2] C. H. Bennett, G. Brassard, Quantum cryptography: Public key distribution and coin
244 tossing, in: Proc. of IEEE Int. Conf. on Comp., Syst. and Signal Proc., Bangalore, India,
245 Dec. 10-12, 1984, 1984.
- 246 [3] P. W. Shor, J. Preskill, Simple proof of security of the bb84 quantum key distribution
247 protocol, Physical review letters 85 (2) (2000) 441.
- 248 [4] M. A. Nielsen, I. Chuang, Quantum computation and quantum information (2002).
- 249 [5] S. Pirandola, U. L. Andersen, L. Banchi, M. Berta, D. Bunandar, R. Colbeck,
250 D. Englund, T. Gehring, C. Lupo, C. Ottaviani, et al., Advances in quantum
251 cryptography, Advances in optics and photonics 12 (4) (2020) 1012–1236.
- 252 [6] X. Ma, B. Qi, Y. Zhao, H.-K. Lo, Practical decoy state for quantum key distribution,
253 Physical Review A 72 (1) (2005) 012326.
- 254 [7] L. Liu, Y. Wang, E. Lavie, C. Wang, A. Ricou, F. Z. Guo, C. C. W. Lim, Practical
255 quantum key distribution with non-phase-randomized coherent states, Physical Review
256 Applied 12 (2) (2019) 024048.
- 257 [8] A. Gaidash, G. Miroshnichenko, A. Kozubov, Subcarrier wave quantum key distribution
258 with leaky and flawed devices, JOSA B 39 (2) (2022) 577–585.
- 259 [9] E. Diamanti, A. Leverrier, Distributing secret keys with quantum continuous variables:
260 principle, security and implementations, Entropy 17 (9) (2015) 6072–6092.

- [10] R. Goncharov, I. Vorontsova, D. Kirichenko, I. Filipov, I. Adam, V. Chistiakov, S. Smirnov, B. Nasedkin, B. Pervushin, D. Kargina, et al., The rationale for the optimal continuous-variable quantum key distribution protocol, *Optics* 3 (4) (2022) 338–351.
- [11] Gleim, A. V., et al. "Secure polarization-independent subcarrier quantum key distribution in optical fiber channel using BB84 protocol with a strong reference." *Optics express* 24.3 (2016): 2619-2633.
- [12] G. Miroshnichenko, A. Kozubov, A. Gaidash, A. Gleim, D. Horoshko, Security of subcarrier wave quantum key distribution against the collective beam-splitting attack, *Optics express* 26 (9) (2018) 11292–11308.
- [13] Кынев, С. М., Чистяков В.В., Иночкин М.В, и др. "Перспективы построения систем квантовой коммуникации на боковых частотах на отечественной компонентной базе *Известия вузов. Радиофизика*. 1 (67) (2024) 43–57.
- [14] J. Mora, A. Ruiz-Alba, W. Amaya, A. Martínez, V. García-Muñoz, D. Calvo, J. Capmany, Experimental demonstration of subcarrier multiplexed quantum key distribution system, *Optics letters* 37 (11) (2012) 2031–2033.
- [15] A. Bahrami, A. Lord, T. Spiller, Quantum key distribution integration with optical dense wavelength division multiplexing: a review, *IET Quantum Communication* 1 (1) (2020) 9–15.
- [16] R. Kumar, H. Qin, R. Alléaume, Coexistence of continuous variable qkd with intense dwdm classical channels, *New Journal of Physics* 17 (4) (2015) 043027.
- [17] S. Kynev, V. Chistyakov, S. Smirnov, K. Volkova, V. Egorov, A. Gleim, Free-space subcarrier wave quantum communication, in: *Journal of Physics: Conference Series*, Vol. 917, IOP Publishing, 2017, p. 052003.

- [18] E. Samsonov, R. Goncharov, A. Gaidash, A. Kozubov, V. Egorov, A. Gleim,
Subcarrier wave continuous variable quantum key distribution with discrete modulation:
mathematical model and finite-key analysis, *Scientific Reports* 10 (1) (2020) 10034.
- [19] E. Samsonov, R. Goncharov, M. Fadeev, A. Zinoviev, D. Kirichenko, B. Nasedkin,
A. Kiselev, V. Egorov, Coherent detection schemes for subcarrier wave continuous
variable quantum key distribution, *JOSA B* 38 (7) (2021) 2215–2222.
- [20] I. Suleiman, J. A. H. Nielsen, X. Guo, N. Jain, J. Neergaard-Nielsen, T. Gehring,
U. L. Andersen, 40 km fiber transmission of squeezed light measured with a real local
oscillator, *Quantum Science and Technology* 7 (4) (2022) 045003.
- [21] S. Kleis, M. Rueckmann, C. G. Schaeffer, Continuous variable quantum key distribution
with a real local oscillator using simultaneous pilot signals, *Optics letters* 42 (8) (2017)
1588–1591.
- [22] N. Jain, H.-M. Chin, H. Mani, C. Lupo, D. S. Nikolic, A. Kordts, S. Pirandola,
T. B. Pedersen, M. Kolb, B. Ömer, et al., Practical continuous-variable quantum key
distribution with composable security, *Nature communications* 13 (1) (2022) 4740.
- [23] B. Qi, P. Lougovski, R. Pooser, W. Grice, M. Bobrek, Generating the local oscillator
“locally” in continuous-variable quantum key distribution based on coherent detection,
Physical Review X 5 (4) (2015) 041009.
- [24] K. S. Mel’nik, N. M. Arslanov, O. I. Bannik, L. R. Gilyazov, V. I. Egorov, A. V. Gleim,
S. A. Moiseev, Using a Heterodyne Detection Scheme in a Subcarrier Wave Quantum
Communication System, *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics* 82 (8)
(2018) 1038–41.

- 306 [25] E. Samsonov, R. Goncharov, A. Gaidash, A. Kozubov, V. Egorov, A. Gleim,
307 Subcarrier wave continuous variable quantum key distribution with discrete modulation:
308 mathematical model and finite-key analysis, Scientific Reports. 10 (2020).
- 309 [26] R. Goncharov, E. Samsonov, A.D. Kiselev, Subcarrier wave quantum key distribution
310 system with gaussian modulation, Journal of Physics: Conference Series. 2103 (2021)
311 012169.
- 312 [27] Samsonov, E., Goncharov, R., Gaidash, A. et al. Subcarrier wave continuous variable
313 quantum key distribution with discrete modulation: mathematical model and finite-key
314 analysis. Sci Rep 10, 10034 (2020).