

## НОВЫЕ РАДИОЭЛЕКТРОННЫЕ СИСТЕМЫ И ЭЛЕМЕНТЫ

УДК 621.3.087.92:535.8

### ФОТОННЫЙ АНАЛОГОВО-ЦИФРОВОЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ С ЭЛЕКТРОННЫМ КВАНТОВАНИЕМ И ОПТИЧЕСКОЙ ВЫБОРКОЙ НА СКОРОСТИ ДО 10 Гвыб/с

© 2023 г. М. С. Дадашев<sup>а</sup>, Д. С. Земцов<sup>б</sup>, Е. Ю. Злоказов<sup>б</sup>, В. А. Небавский<sup>б</sup>, В. Г. Осипов<sup>а</sup>, П. А. Павлов<sup>а, \*</sup>, А. С. Романов<sup>а</sup>, Р. С. Стариков<sup>б, \*\*</sup>, И. Ж. Хафизов<sup>б</sup>

<sup>а</sup> АО Научно-технический центр “Модуль”,

4-я ул. 8 Марта, 3, Москва, 125167 Российская Федерация

<sup>б</sup> Национальный исследовательский ядерный университет “МИФИ”,

Каширское ш., 31, Москва, 115409 Российская Федерация

\*E-mail: p.pavlov@module.ru

\*\*E-mail: rstarikov@mail.ru

Поступила в редакцию 12.03.2020 г.

После доработки 01.09.2022 г.

Принята к публикации 25.09.2022 г.

Представлен экспериментальный фотонный аналогово-цифровой преобразователь, предназначенный для обработки сигналов X-диапазона. Исследовано функционирование созданного устройства в лабораторных и полевых условиях.

DOI: 10.31857/S0033849423020031, EDN: LBFVEQ

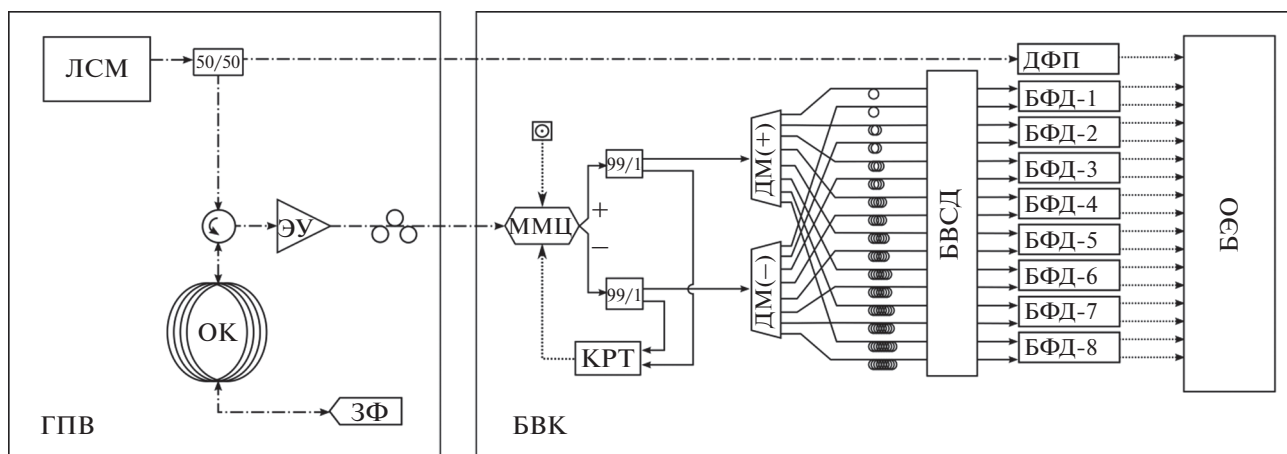
#### ВВЕДЕНИЕ

Фотонные аналогово-цифровые преобразователи с оптической выборкой привлекательны благодаря низкой апертурной ошибке лазеров, работающих в режиме синхронизации мод, потенциально обеспечивающей высокую точность преобразования, а также благодаря широкой полосе, обеспечиваемой компонентами микроволновой фотоники. К настоящему времени известен ряд успешных работ, основанных на такой идее, в том числе предназначенных для применения в реальных радиотехнических системах [1–14]. В данной статье представлен экспериментальный фотонный АЦП, предназначенный для обработки сигналов X-диапазона.

#### 1. ОПИСАНИЕ СИСТЕМЫ

Система представляет из себя фотонный АЦП (ФАЦП) с оптической выборкой и электронным квантованием (рис. 1). В качестве источника излучения использован лазер С-диапазона, работающий в режиме синхронизации мод (ЛСМ, Onefive Origami-15), с частотой повторения импульсов 1.25 ГГц и с шириной спектра на полувысоте около 10 нм. Измеренная апертурная ошибка использованного образца ЛСМ составляет не более 8.1 фс, измеренные оптический спектр и диаграмма фазовых шумов лазера представлены на рис. 2. Для

формирования оптической мультиспектральной последовательности выборки используется дисперсионный элемент, реализованный на оптоволоконном кабеле (ОК) длиной около 2.2 км и зеркале Фарадея (ЗФ), подключенный через циркулятор и работающий в два прохода, что обеспечивает chirпирование импульсов ЛСМ и их растяжение до длительности, равной периоду их повторения. Сформированная таким образом непрерывная оптическая мультиспектральная последовательность выборки усиливается эрбиевым волоконным усилителем (ЭУ, FORC-Photonics FOA-EDFA-20-PDA-1) и после контроллера поляризации поступает на вход модулятора Маха-Цендера (ММЦ). В системе использован ММЦ с двойным выходом (Eospace AX-1x2-0MSS-20) с полосой входных сигналов 20 ГГц, рабочая точка ММЦ обеспечивается контроллером рабочей точки (КРТ, YUlabs-0103). Модулированное световое излучение с каждого из выходов ММЦ поступает на демультиплексоры (ДМ(–) и ДМ(+), стандартные с ITU сеткой 100 ГГц, для снижения перекрестных помех до уровня –45 дБ использован каждый второй канал). На выходах соответствующих спектральных каналов демультиплексоров формируется комплементарный оптический сигнал, по интенсивности эквивалентный значениям выборки преобразуемого радиосигнала. Относительные задержки каналов ДМ компенсированы: с одной стороны, приблизительно – отрезками оптоволокна с точ-



**Рис. 1.** Схема фотонного аналого-цифрового преобразователя: ГПВ – генератор последовательности выборки, ЛСМ – лазер с синхронизацией мод, ЭУ – эрбиевый усилитель, ОК – оптоволоконный кабель, ЗФ – зеркало Фарадея, БВК – блок выборки и квантования, ММЦ – модулятор Маха–Цендера, КРТ – контроллер рабочей точки, ДМ – демультиплексор, БВСД – блок выравнивания сигнальных длин, ДФП дифференциальный фотоприемник, БФД – балансный фотодетектор, БЭО – блок электронной обработки.

ностью 50 пс, с другой, точно – блоком выравнивания сигнальных длин (БВСД) на основе перестраиваемых оптико-механических линий задержки (изготовлен фирмой “ОПТЭЛ”, Москва), результирующая точность компенсации составляет около 10 пс. Оптические сигналы соответствующих каналов демультиплексоров поступают на входы балансных фотодетекторов (БФД, Picometrix BR-20D, полоса 20 ГГц), которые формируют электрические сигналы, поступающие в блок электронной обработки (БЭО, разработан ЗАО НТЦ “Модуль”). БЭО выполняет необходимую постдетекторную обработку сигналов фотодетекторов и их квантование, он состоит из постдетекторной электроники, электронных линий задержки, системы синхронизации и электронных АЦП с частотой выборки до 1.6 Гвыб/с. БЭО синхронизируется сигналами, получаемыми от ЛСМ и принимаемыми дифференциальным фотоприемником (ДФП, Picometrix PT-40) с полосой пропускания 40 ГГц.

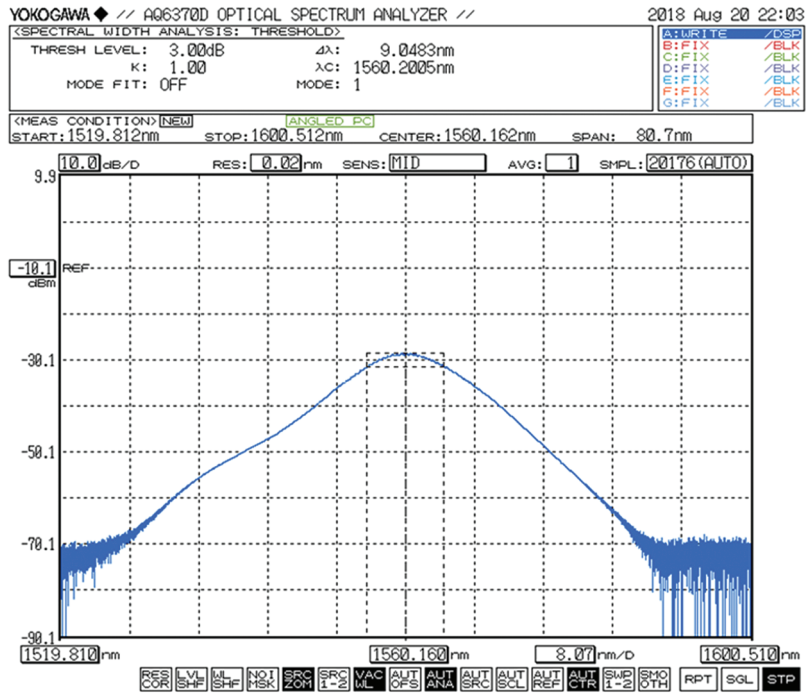
Построенная система позволяет менять различные настройки режима работы как оптических, так и электронных элементов. В частности, имеется возможность варьирования глубины модуляции ММЦ, мощности оптического сигнала, числа используемых оптических комплементарных каналов от одного до восьми, а также осуществлять необходимые подстройки электроники, исходя из выбора зоны Найквиста. При использовании всех восьми балансных каналов построенная система обеспечивает скорость преобразования 10 Гвыб/с и позволяет выполнять аналого-цифровое преобразование сигналов диапазонов до 20 ГГц с мгновенной полосой до 5 ГГц.

## 2. ИССЛЕДОВАНИЕ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СИСТЕМЫ В ЛАБОРАТОРНЫХ И ПОЛЕВЫХ УСЛОВИЯХ

Работа устройства была исследована. Пример осциллограммы комплементарного сигнала, формируемого после фотодетектирования в одном канале системы представлен на рис. 3а, результат измерения свободного динамического диапазона (СДД) при подаче на вход системы двухтонового сигнала – на рис. 3б. Такой результат соответствует эффективному числу бит (ЭЧБ) 6.3. Примеры восстановленных оцифрованных сигналов X-диапазона (однотоновый сигнал, двухтоновый сигнал) представлены на рис. 3в и 3г.

Два экземпляра описываемого устройства были изготовлены и использованы в составе двухканальной радиотехнической системы X-диапазона, которая была испытана в полевых условиях осенью 2018 г. Фото и блок-схема радиотехнической системы представлены на рис. 4. Полевые тесты включали эксперименты по оцифровке сигналов X-диапазона, принимаемых из эфира, и оценку азимутального угла положения источника сигнала. Стандартная рупорная антенна, передающая усиленный сигнал генератора сигналов произвольной формы Keysight M8195A, была использована в качестве источника сигнала. На рис. 5 приведены примеры спектров сигналов X-диапазона, которые были синтезированы, переданы в эфир (а) и приняты и оцифрованы двумя каналами ФАЦП (б, в). При преобразовании радиосигналов в реальных условиях, ЭЧБ, достигнутое системой, при варьировании настроек системы составило от 3.6 до 5.5. Были проведены эксперименты по определению направления положения источника сигнала в диапазоне ±10 град относительно ос-

(a)



(б)

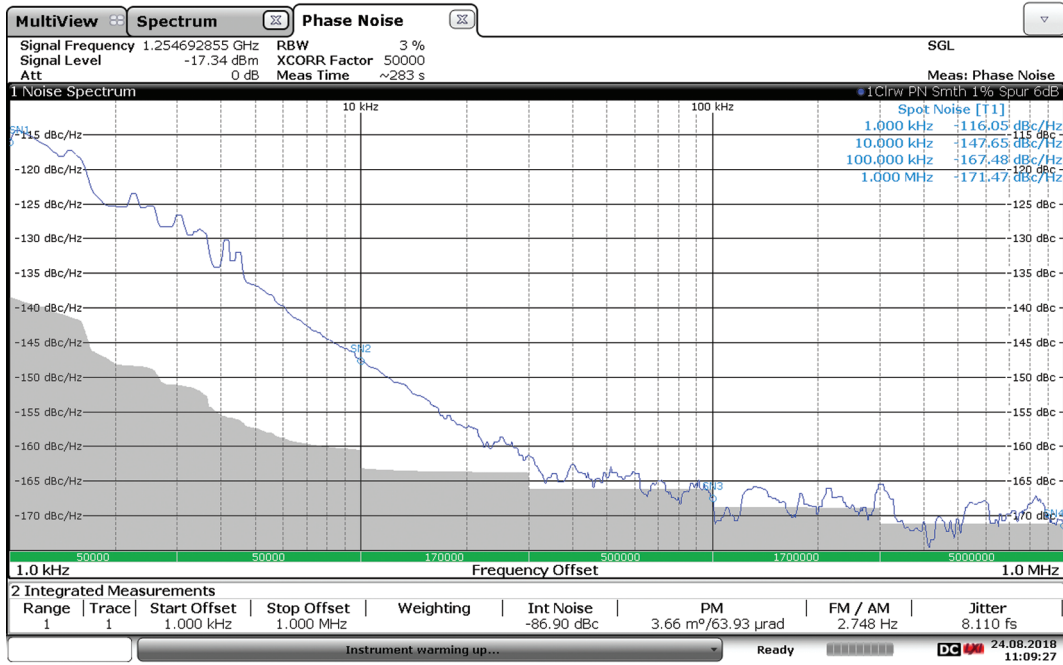
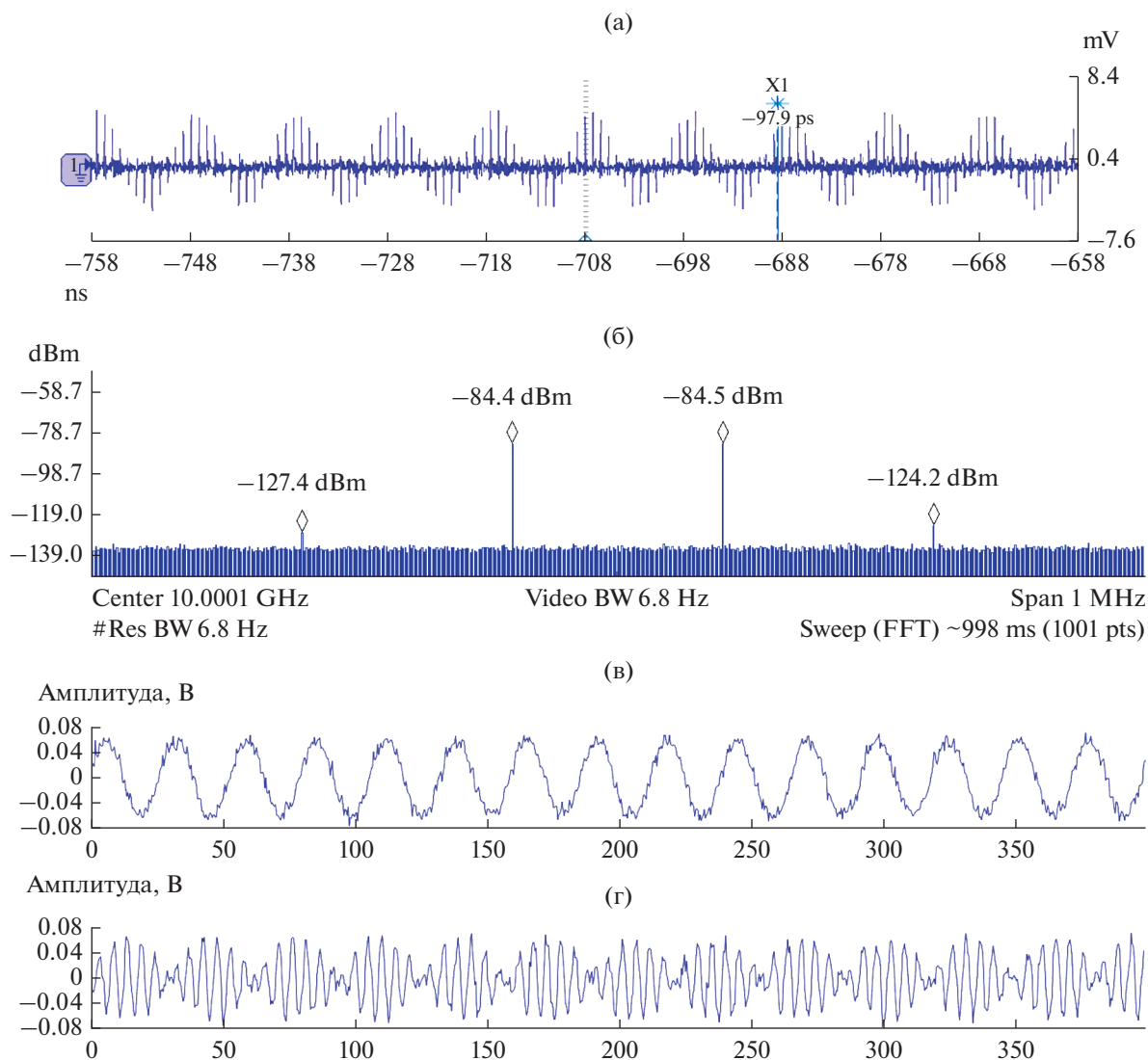


Рис. 2. Оптический спектр (а) (измерено Yokogawa AQ6370) и диаграмма фазовых шумов лазера (б) (измерено Rohde & Schwarz FSWP50), работающего в режиме синхронизации мод; скриншот.

нового лепестка диаграммы направленности приемной антенной системы. Оба канала принимали одинаковый сигнал – со сдвигом, зависящим от положения источника. Выходные

цифровые сигналы системы были переданы на персональный компьютер, на котором с использованием специально разработанного программного обеспечения были проанализирова-



**Рис. 3.** Лабораторные тесты системы: а – выборка однотонового сигнала 12.5 ГГц (с понижением до первой зоны Найквиста), получено с дифференциальных выходов БФД от одного комплементарного выходного канала (измерено Keysight DSAZ334A); б – спектрограмма измерения СДД в одном комплементарном выходном канале с использованием двухтонового теста (измерено Keysight N9030B, частоты теста  $f_1 = 10.0$  ГГц,  $f_2 = 10.0002$  ГГц, цифрами показана мощность на соответствующих частотах); в – однотоновый сигнал, восстановленный с цифрового выхода ФАЦП; г – двухтоновый сигнал, восстановленный с цифрового выхода ФАЦП.

ны и азимутальный угол положения источника был успешно рассчитан (рис. 6).

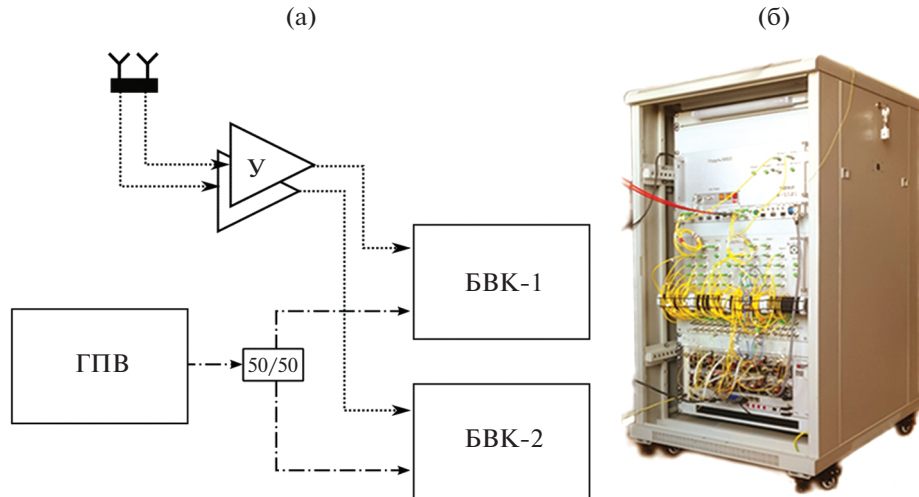
### 3. СИСТЕМА ФОРМИРОВАНИЯ ДИСКРЕТНОЙ ОПТИЧЕСКОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ ВЫБОРКИ

Исследование работы системы показало, что основными факторами, снижающими ЭЧБ, являются ограничения энергетического бюджета сигнала, технические проблемы с синхронизацией и ограничения линейности использованных фотодетекторов. Для оценки возможностей улучшения характеристик ФАЦП была исследована схема фор-

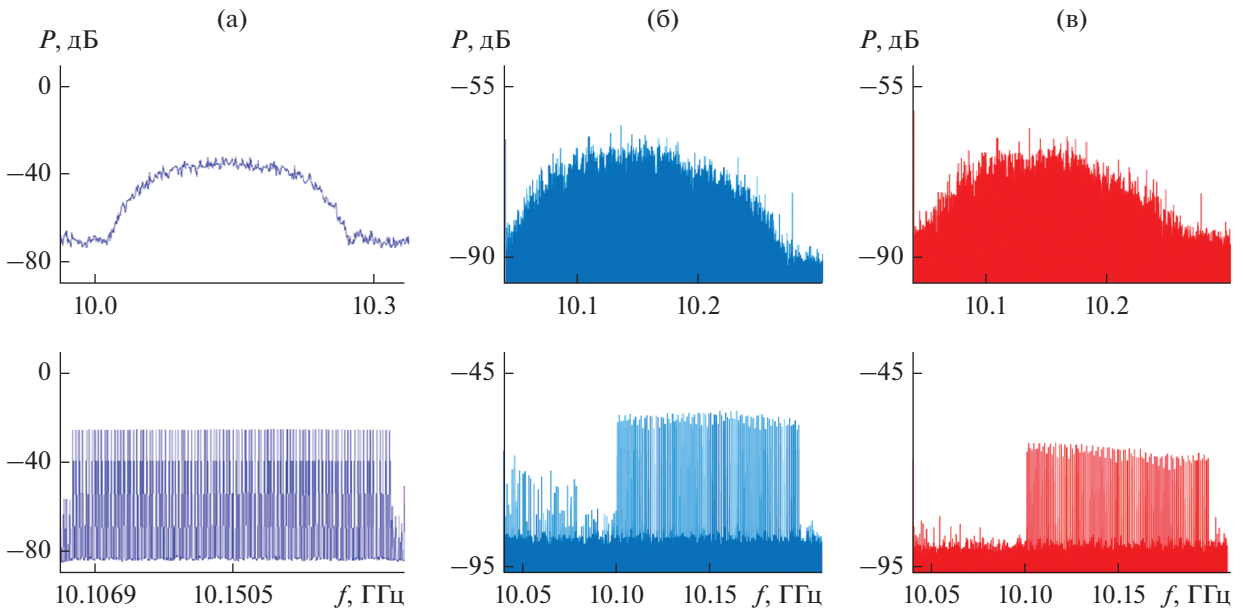
мирования дискретной мультиспектральной оптической последовательности выборки.

К настоящему времени известны варианты схем формирования дискретной мультиспектральной оптической последовательности выборки, позволяющие добиться эквидистантного следования спектральных компонент [1, 5, 9, 13]. Такие схемы базируются на одном или двух демультиплексорах и линиях задержки, помещаемых в каналы демультиплексирования.

Были проведены эксперименты с системой формирования оптической последовательности выборки, построенной на базе циркулятора с сохранением поляризации, демультиплексора, зеркал Фарадея,



**Рис. 4.** Блок-схема (а) и фото (б) двухканальной радиотехнической системы на базе ФАЦП: ГПВ – генератор последовательности выборки, БВК-1, БВК-2 – блоки выборки и квантования, У – усилитель.



**Рис. 5.** Спектры сигналов, передаваемых в эфир (а) и оцифрованных принятых в 1-м (б) и 2-м (в) каналах системы: верхняя строка – широкополосный шум, нижняя – 100-тоновый сигнал.

перестраиваемых оптомеханических линий задержки и перестраиваемых оптических аттенуаторов. Эксперимент, по сути, состоял в выполнении двухтонового теста для одного канала ФАЦП и иллюстрируется на рис. 7.

Излучение ЛСМ поступает в подключенный через циркулятор демультиплексор, используемые спектральные каналы которого должны соответствовать используемым в демультиплексорах всей схемы. В каждом канале демультиплексора установлены переменный оптический аттенуатор и двухпроходная переменная оптическая линия за-

держки с зеркалом Фарадея (ПЛЗФ, General Photonics MDL-002). Настройки элементов в каналах демультиплексора позволяют выровнять оптические импульсы по интенсивности и добиться их нужного положения друг относительно друга по времени следования. Преимущество такой конфигурации также состоит в том, что только выбранные спектральные компоненты усиливаются. Сформированная таким образом дискретная оптическая последовательность выборки усиливается эрбиевым усилителем импульсных сигналов (ЭУ, KEOPSYS PEFA-SP) и после контроллера

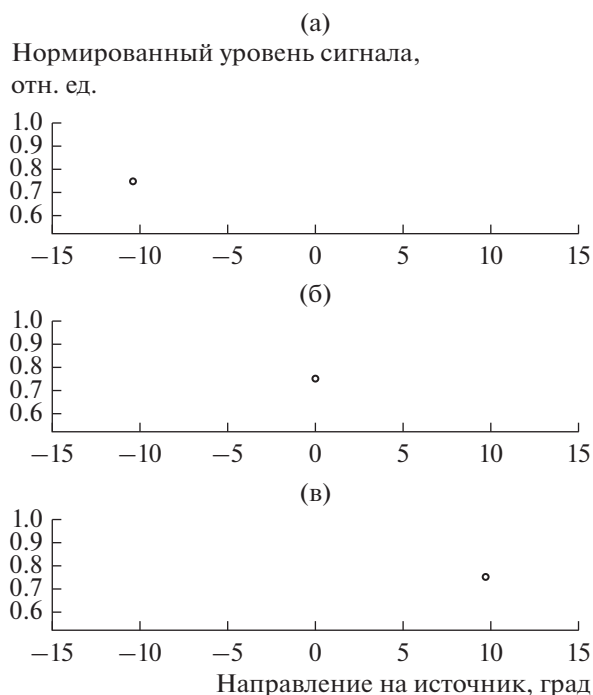


Рис. 6. Результаты оценки угла направления на источник для -10 (а), 0 (б) и +10 град (в).

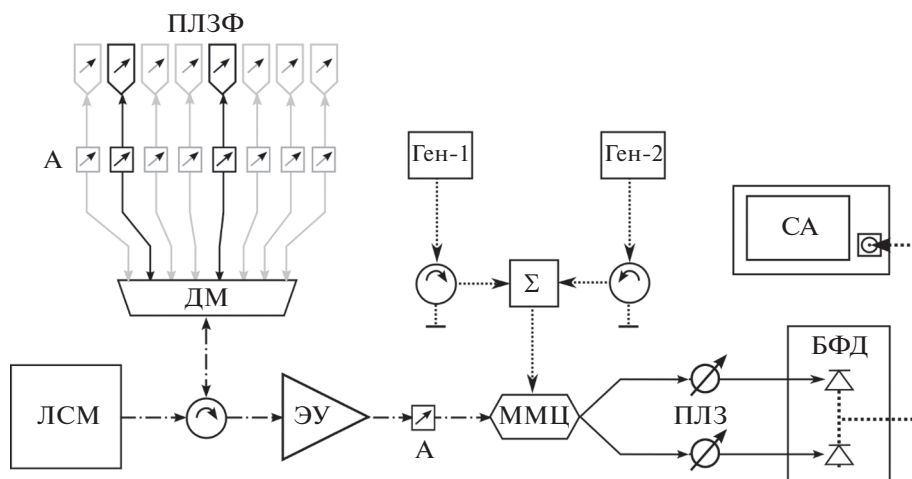


Рис. 7. Схема исследования системы генерации последовательности выборки: ЛСМ – лазер в режиме синхронизации мод, ДМ – демультиплексор, ПЛЗ – переменная задержки, ПЛЗФ – ПЛЗ с зеркалом Фарадея, ЭУ – эрбиевый усилитель, А – аттенюаторы, Ген-1, Ген-2 – генераторы, ММЦ – модулятор Маха–Цендера, БФД – балансный фотодетектор, СА – сигнальный анализатор.

поляризации (на рисунке не показан) поступает на вход ММЦ. На выходах ММЦ формируется комплементарный оптический сигнал, по интенсивности соответствующий значениям выборки преобразуемого радиосигнала. Относительные задержки выходов ММЦ компенсированы перестраиваемыми оптико-механическими линиями задержки, что позволяет также эксперименталь-

но оценить допустимое временное рассогласование в каналах балансного детектирования. ММЦ управляется радиочастотным (РЧ) сигналом, полученным суммированием двух тонов аналоговых генераторов с низким фазовым шумом (Ген-1, Ген-2, Advantech UNO-01M) через РЧ-циркуляторы. Оптические сигналы регистрируются высоколинейным балансным фотодетектором (БФД,



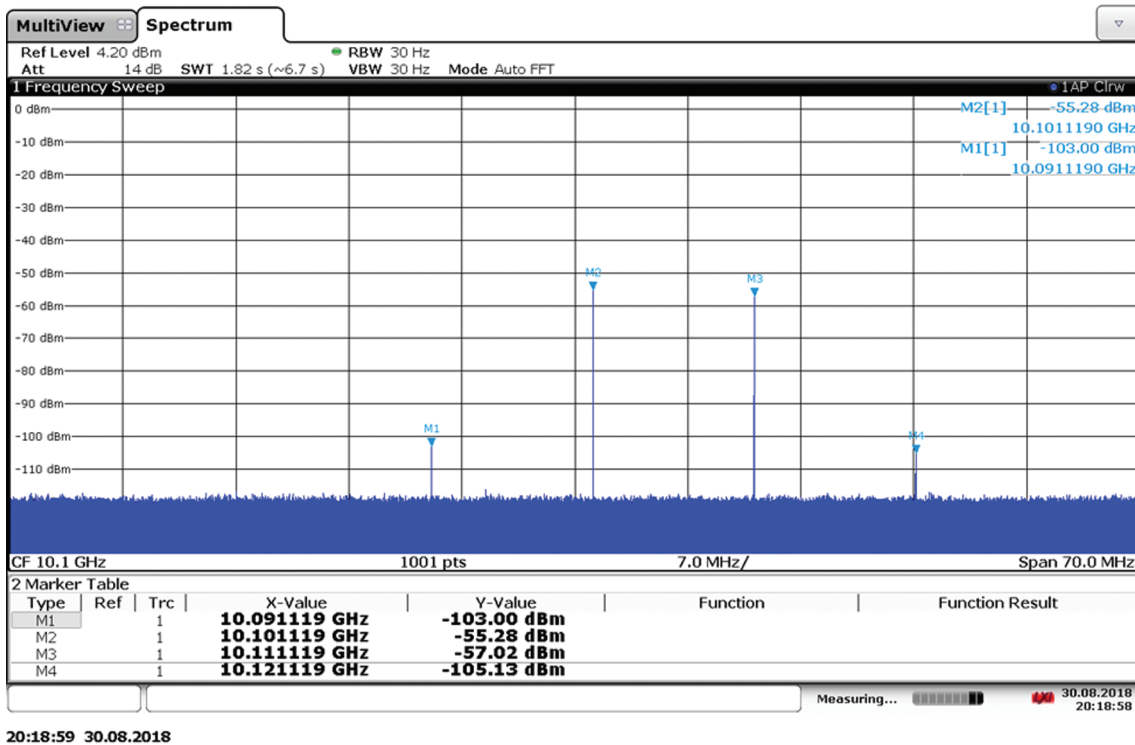


Рис. 8. Результат измерения свободного динамического диапазона схемы, представленной на рис. 7; скриншот.

Discovery DSC-730-39) с 3 дБ полосой пропускания свыше 20 ГГц.

Рисунок 8 демонстрирует результат двухтонового анализа для случая мощности радиосигнала на входе ММЦ 10 дБм (что довольно много с точки зрения оптимальной глубины модуляции); таким образом, для разумных значений глубины модуляции ЭЧБ может превышать 7. Близкие результаты получены для всей полосы работы системы.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представлен фотонный АЦП с оптической выборкой и электронным квантованием. Фотонный АЦП предназначен для преобразования сигналов до 20 ГГц в полосу до 5 ГГц. Работа системы исследована в лабораторных и натуральных условиях. Рассмотрена возможность улучшения характеристик системы. Продемонстрирована возможность выполнения аналого-цифрового преобразования сигналов X-диапазона с эффективным числом бит более 7.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Valley G. // Opt. Express. 2007. V.15. № 5. P. 1955.
2. Стариков П. // Успехи совр. радиоэлектроники. 2015. № 2. С. 3.
3. Starikov R. // Proc. SPIE. 2016. V. 10176. P.1017618.
4. Frankel M., Kang J., Esman R. // Electron. Lett. 1997. V. 33. № 25. P. 2096.
5. Kang J., Esman R. // Electron. Lett. 1999. V. 35. № 1. P. 60.
6. Yariv A., Koumans R. // Electron. Lett. 1998. V. 34. № 21. P. 2012.
7. Juodawlkis P., Twichell J., Betts G. et al. // IEEE Trans. 2001. V. MTT-49. № 10. P. 1840.
8. Llorente R., Morant M., Puche J. et al. // IEEE Trans. 2010. V. MTT-58. № 11. Pt. 2. P. 3304.
9. Khilo A., Spector S., Grein M. et al. // Opt. Express. 2012. V. 20. № 4. P. 4454.
10. Ghelfi P., Laghezza F., Scotti F. et al. // Nature. 2014. V. 507. № 7492. P. 341.
11. Esman D., Wiberg A., Ali N., Radic S. // J. Lightwave Technol. 2015. V. 33. P. 2256.
12. Piqueras M. // Proc. 2015 Int. Topical Meeting on Microwave Photonics (MWP). Paphos. 26–29 Oct. N.Y.: IEEE, 2015. Article No. 7356716.
13. Yang G., Zou W., Yu L. et al. // Opt. Express. 2016. V. 24. № 21. P. 24061.
14. Cruz P., Alves T., Cartaxo A. // Proc. 2018 20th Int. Conf. on Transparent Optical Networks (ICTON). Bucharest, 1–5 Jul. N.Y.: IEEE, 2018. Article No. 8473984.