ИЗВЕСТИЯ РАН. СЕРИЯ ФИЗИЧЕСКАЯ, 2020, том 84, № 1, с. 67–72

УДК 537.86,535.016

ВЫСОКОЧАСТОТНЫЙ РАДИОФОТОННЫЙ АЦП С МНОГОКАНАЛЬНЫМ ИЗМЕРЕНИЕМ СИГНАЛА В СПЕКТРАЛЬНЫХ ИНТЕРВАЛАХ

© 2020 г. В. В. Кулагин[1, 2, 3, *], В. В. Валуев[3, 4], С. М. Конторов[5], Д. А. Прохоров[3], В. А. Черепенин[2]

[1]*Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова", Государственный астрономический институт имени П.К. Штернберга, Москва, Россия*

[2]*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт радиотехники и электроники имени В.А. Котельникова Российской академии наук, Москва, Россия*

[3]*Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Национальный исследовательский ядерный университет "МИФИ", Москва, Россия*

[4]*Закрытое акционерное общество "Научно-технический центр "Модуль", Москва, Россия*

[5]*Автономная некоммерческая образовательная организация высшего образования "Сколковский институт науки и технологий", Сколково, Россия*

**E-mail: victorvkulagin@yandex.ru*

Поступила в редакцию 29.07.2019 г.
После доработки 30.08.2019 г.
Принята к публикации 27.09.2019 г.

Исследован многоканальный высокочастотный радиофотонный АЦП с разбиением входного сигнала на спектральные интервалы и преобразованием каждого интервала на промежуточную частоту в своем канале. Проведено численное моделирование АЦП и оценены его характеристики, макет АЦП исследован экспериментально. Показано, что на выходе может быть получено 8–10 эффективных бит независимо от несущей частоты входного сигнала.

DOI: 10.31857/S0367676520010184

ВВЕДЕНИЕ

Радиофотоника (микроволновая фотоника в зарубежной литературе) интенсивно развивается в последние годы, предлагая все новые и новые методы генерации, приема и обработки СВЧ сигналов [1–3]. Очевидными преимуществами радиофотонных устройств являются чрезвычайно широкая полоса, которая может составлять 100 ГГц и более, возможность удаленного программного управления режимами работы, гибкость формирования новых устройств, выполняющих определенные функции, защищенность от электромагнитных помех, малый вес и размеры, невысокая стоимость при массовом производстве и др.

Одним из перспективных типов устройств, разрабатываемых в настоящее время на радиофотонной элементной базе, является высокочастотный радиофотонный аналого-цифровой преобразователь (АЦП). В таких АЦП каждый соседний временной отсчет обычно обрабатывается своим каналом [4], причем полный выходной сигнал может быть получен только в результате совместной обработки всех отсчетов, что требует параллельной обработки информации. В то же время для СВЧ сигнала с ограниченной шириной полосы такой метод оцифровки является избыточным, т. к. часть полученных после обработки данных не будет содержать полезной информации и будет отброшена, причем эта часть растет с увеличением отношения несущей частоты к ширине полосы сигнала.

Более эффективным в этом случае может быть подход, основанный на радиофотонном многоканальном преобразовании сигнала на промежуточную частоту с его последующим измерением. Мотивация этого подхода такова: перейти от обработки каждого временного отсчета своим каналом к обработке каждого спектрального интервала своим каналом. Здесь входной СВЧ сигнал с помощью радиофотонных элементов разбивается на несколько спектральных интервалов (каналов), содержащих полезную информацию. Далее в каждом канале применяется радиофотонное преобразование сигнала на промежуточную частоту [5, 6] и его предварительная обработка, и затем сигнал оцифровывается относительно "медленным" электронным АЦП. Во многих случаях

выходные сигналы этих АЦП уже могут быть достаточны для получения необходимой информации, и совместная обработка выходных сигналов всех каналов не потребуется.

В том случае, если требуется восстановление широкополосного входного сигнала в цифровом виде из выходных сигналов нескольких каналов, при обработке сигнала в каждом канале необходимо обеспечить малые нелинейности преобразования и сохранение фазовой информации, т.е. каждый канал должен быть когерентным. Восстановление полного входного СВЧ сигнала из выходных сигналов нескольких каналов может быть обеспечено тогда следующей процедурой. На выходе каждого канала формируется полный спектр, включая фазовую составляющую, той части входного сигнала, которая приходится на спектральный интервал канала. Согласно теореме, обратной теореме Котельникова, по определенному числу отсчетов спектра можно полностью восстановить исходный сигнал во временной области. Таким образом, выбирая из набора отдельных спектров для интервалов нужную последовательность, можно будет с помощью компьютерной обработки получить полный входной сигнал в цифровом виде. Перекрывающиеся участки спектров при этом могут быть использованы для интерполяции восстанавливаемого спектра входного сигнала или для калибровки передаточных характеристик соседних каналов и коррекции данных. В предельном случае, когда ширина полосы частот огибающей не превышает 1–2 ГГц (такие сигналы могут быть оцифрованы коммерческими АЦП в настоящее время), может использоваться всего один канал преобразования.

В некотором смысле предлагаемый подход соответствует традиционным методам обработки широкополосных СВЧ сигналов с помощью электронных устройств, когда для принимаемого сигнала осуществляется многоканальное преобразование частоты вниз. Однако электроника не может обеспечить гибкости и универсальности, доступных устройствам, построенным по радиофотонным технологиям.

Исследовано возможное схемное решение на базе непрерывного лазера и модуляторов для высокочастотного радиофотонного АЦП с многоканальным измерением сигнала в спектральных интервалах. Проведено численное моделирование такого АЦП и оценены его потенциальные характеристики. Создан макет двухканального преобразователя частоты для радиофотонного АЦП и проведены его экспериментальные исследования, которые полностью подтвердили возможность деления входного СВЧ сигнала на спектральные интервалы с последующим их преобразованием на промежуточную частоту. Показано, что при использовании современных оптических элементов в оцифрованном сигнале может быть получено 8–10 эффективных бит независимо от средней частоты спектра сигнала.

РАДИОФОТОННЫЙ АЦП С МНОГОКАНАЛЬНЫМ ИЗМЕРЕНИЕМ СИГНАЛА В СПЕКТРАЛЬНЫХ ИНТЕРВАЛАХ НА БАЗЕ НЕПРЕРЫВНОГО ЛАЗЕРА

Радиофотонные АЦП с многоканальным измерением входного сигнала в отдельных спектральных интервалах могут быть построены с использованием различных схемных решений [7–9]. Вариант построения схемы АЦП на основе высокостабильного непрерывного лазера представлен на рис. 1. Поле лазера модулируется по амплитуде входным сигналом СВЧ в модуляторе MZM(1). Далее, промодулированный оптический сигнал проходит через гребенку полосовых оптических фильтров OFS, и на выходе каждого фильтра формируются оптические сигналы, содержащие определенную часть спектра входного сигнала СВЧ. Чтобы извлечь эти сигналы, необходимо выполнить радиофотонное преобразование частоты вниз [6]. Для формирования опорных оптических сигналов с частотами $\omega_{opt} + \omega_{LO_i}$ для гетеродинирования может быть использован ряд амплитудных электрооптических модуляторов, на вход которых поступают соответствующие опорные СВЧ-сигналы (электрооптические модуляторы MZM(2)...MZM(N + 1) на рис. 1). Гребенка полосовых оптических фильтров OFR(1)...OFR(N) обеспечивает выбор опорных частот $\omega_{opt} + \omega_{LO_i}$, которые используются затем в качестве локальных осцилляторов (для каждого канала, т.е. для каждой части спектра входного сигнала СВЧ, используется своя мода для гетеродинирования). В результате в каждом канале могут применяться медленные фотоприемник и электронное АЦП (их полоса пропускания определяется полосой оптических фильтров). Эта схема может быть наиболее эффективной для умеренного числа спектральных интервалов, например, для 5–10, которые могут охватывать полосу частот шириной 10–20 ГГц при использовании современных электронных АЦП.

Для более широких полос спектра сигнала в качестве источника света можно применить лазер с синхронизацией мод, что позволит использовать общее число мод на уровне нескольких сотен. В этом случае оптические моды для гетеродинирования сигналов в каналах АЦП могут быть выделены оптическими фильтрами, а гребенка синхронизированных опорных СВЧ-сигналов с разными частотами для преобразования сигналов на промежуточную частоту в различных каналах уже не потребуется. Вместо многомодового лазера также может быть использована схема, включающая высокостабильный непрерывный лазер и несколько амплитудных или фазовых модуляторов с

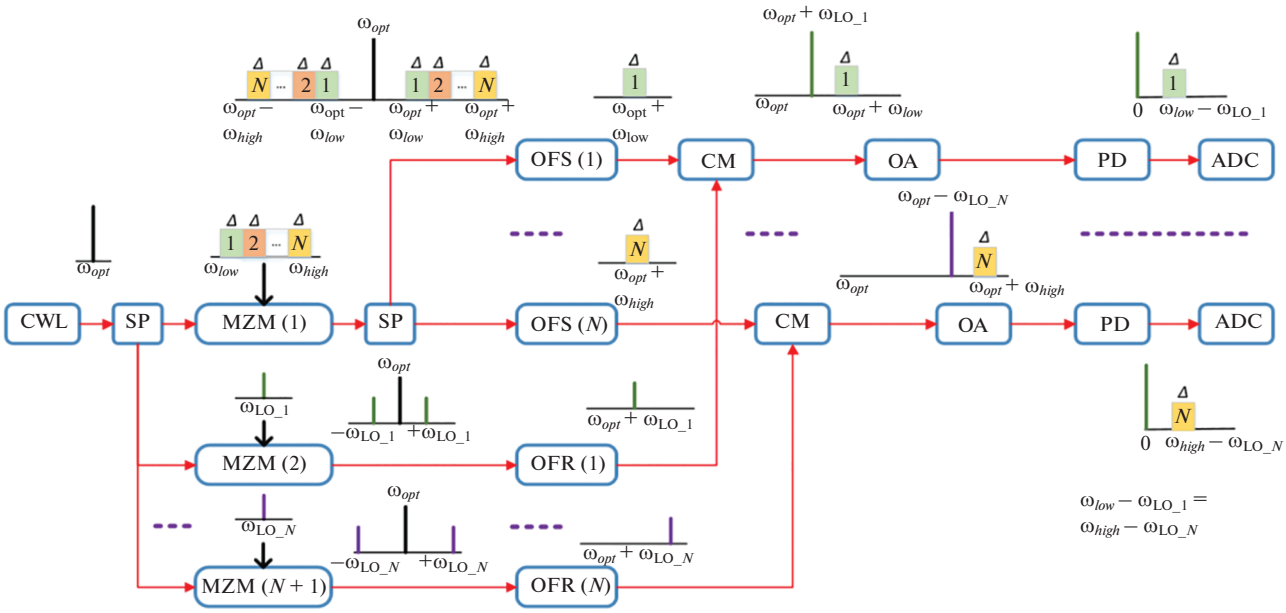


Рис. 1. Блок-схема фотонного АЦП на основе непрерывного лазера и модуляторов, формирующих опорные сигналы: CWL – высокостабильный непрерывный лазер, SP – делители, OFS – оптические сигнальные фильтры, OFR – оптические опорные фильтры, MZM – амплитудные модуляторы Маха–Цандера, CM – сумматоры, OA – оптические усилители, PD – фотоприемники, ADC – электронные АЦП, ω_{low} и ω_{high} – нижняя и верхняя частоты в спектре широкополосного сигнала, ω_{opt} – несущая лазера, ω_{LO_i} – СВЧ колебания для формирования опорных оптических частот, Δ – часть полосы широкополосного сигнала, соответствующая одному спектральному интервалу.

большим индексом модуляции для генерации достаточного количества боковых линий. В простейшем случае может быть использован только один амплитудный модулятор с двумя независимыми входами [10]. Выделение нужных линий из гребенки частот будет осуществляться, как и в случае многомодового лазера, узкополосными оптическими фильтрами. Преимуществом таких систем является возможность независимо задавать среднюю частоту гребенки, определяемую частотой непрерывного лазера, и расстояние между линиями в ней, которое определяется частотой модуляции. При этом шумовые характеристики гребенки зависят в основном от шумовой структуры модулирующего радиочастотного сигнала и характеристик непрерывного лазера. Использование опто-электронного генератора для формирования модулирующего радиочастотного сигнала позволит существенно снизить фазовые шумы всей системы. Достоинством таких систем является также возможность генерации гребенок с заданным количеством частотных линий, что существенно увеличивает энергоэффективность АЦП.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ СИГНАЛА В РАДИОФОТОННОМ АЦП

Для исследования характеристик предлагаемого подхода были с помощью кода OptiSystem [11] проведены численные моделирования преобразования сигнала в двухканальном радиофотонном АЦП с измерением в спектральных интервалах. В моделированиях учитывались шумы лазера, тепловые шумы и шум фотодетектирования. На вход АЦП подавался СВЧ сигнал с линейной модуляцией частоты со спектром от 14 до 18 ГГц (рис. 2*а*). Моделировалась схема с непрерывным лазером, две опорные оптические линии для гетеродинирования с частотами, смещенными на 11 и 13 ГГц относительно оптической несущей, формировались в двух каналах с помощью амплитудных модуляторов и оптических фильтров. Сигналы на выходах обоих каналов после гетеродинирования имели промежуточную частоту 4 ГГц и ширину полосы 2 ГГц. Таким образом моделировалась работа многоканального преобразователя частоты.

Далее считалось, что полученные сигналы оцифрованы в каждом канале с сохранением фазовой информации, после чего они передавались для компьютерной обработки. Целью такой обработки было показать, что восстановленный сигнал совпадает с входным в полосе сигнала. Сигналы с выхода каждого канала численно сдвигались на величину опорной частоты, применяемой для гетеродинирования в этом канале (11 или 13 ГГц), после этого спектры сигналов объединялись. Амплитудные и фазовые спектры входящего широкополосного микроволнового сигнала и математически вос-

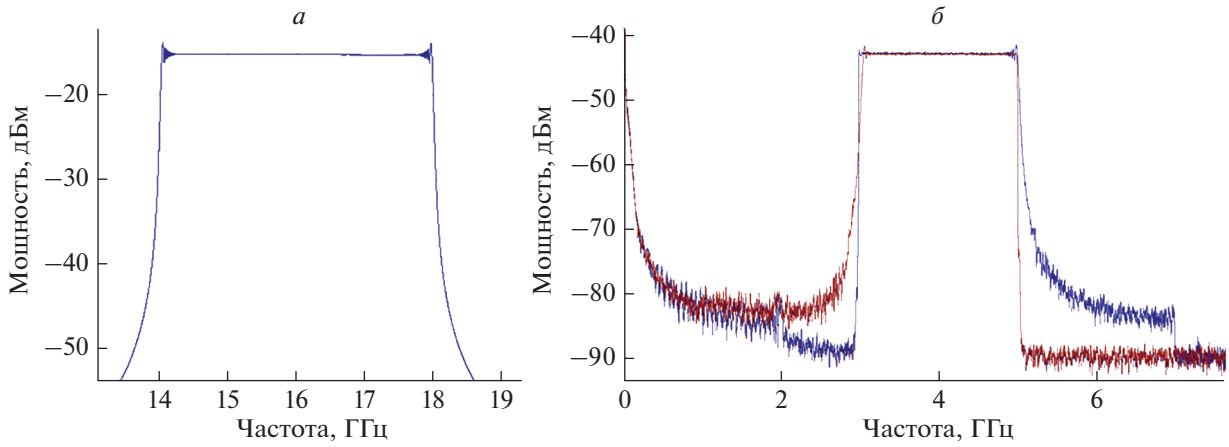


Рис. 2. Амплитудный спектр широкополосного СВЧ сигнала (*а*) на входе в двухканальный радиофотонный АЦП и спектры сигналов на двух его выходах после преобразования на промежуточную частоту 4 ГГц (*б*).

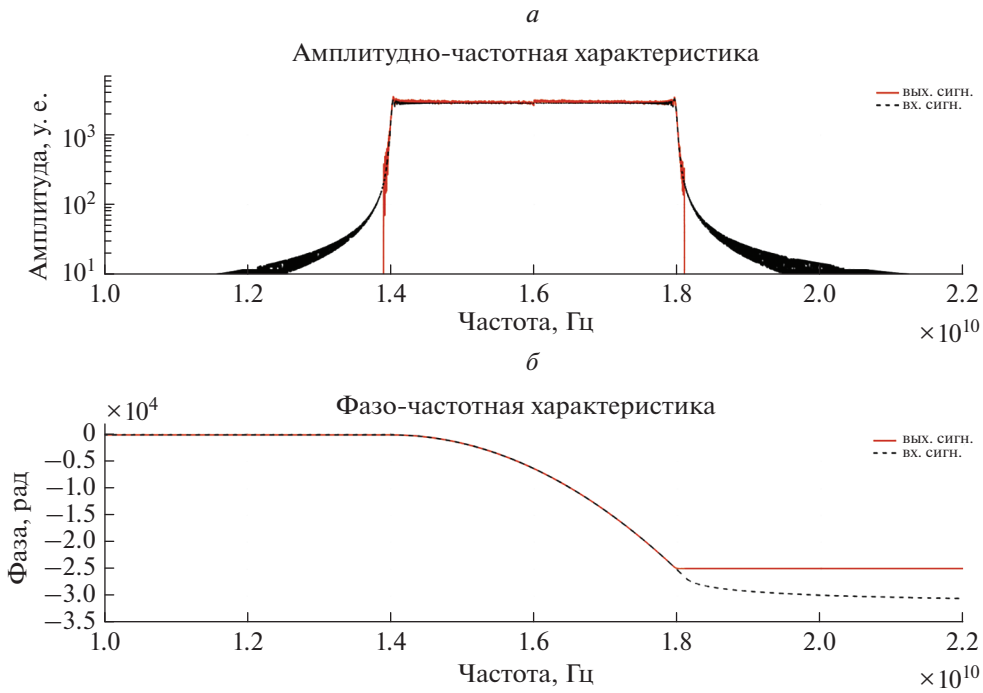
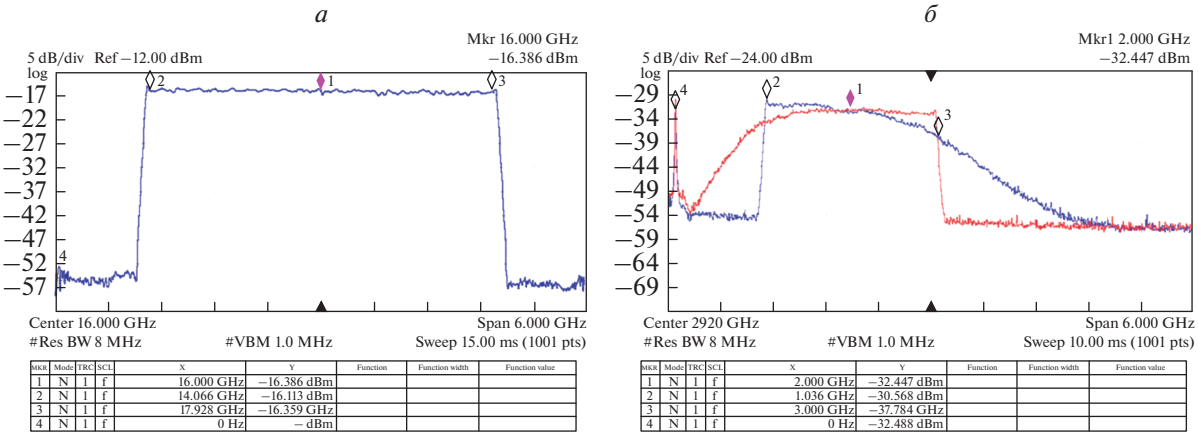


Рис. 3. Амплитудный (*а*) и фазовый (*б*) спектры входящего широкополосного микроволнового сигнала (черная штриховая линия) и математически восстановленного сигнала (красная непрерывная линия) после обработки фотонным АЦП в численном моделировании.

становленного после обработки радиофотонным АЦП сигнала представлены на рис. 3. В полосе спектра сигнала исходные и восстановленные кривые совпадают с хорошей точностью, вне полосы расхождение более заметно. Небольшие отклонения на рис. 3*а* в амплитудном спектре сигнала, прошедшего через радиофотонный АЦП, связаны с зависимостью коэффициента передачи амплитудного модулятора от частоты. В реальном устройстве зависимость коэффициента передачи от частоты может быть заранее измерена и затем учтена при обработке выходных сигналов различных каналов. С учетом этого анализ кривых на рис. 3 показывает, что минимальная ошибка восстановления входного сигнала, определяемая внутренними шумами радиофотонного АЦП, соответствует 8–10 эффективным битам в оцифрованном сигнале при использова-



MKR	Mode	TRC	SCL	X	Y	Function	Function width	Function value
1	N	1	f	16.000 GHz	−16.386 dBm			
2	N	1	f	14.066 GHz	−16.113 dBm			
3	N	1	f	17.928 GHz	−16.359 GHz			
4	N	1	f	0 Hz	– dBm			

MKR	Mode	TRC	SCL	X	Y	Function	Function width	Function value
1	N	1	f	2.000 GHz	−32.447 dBm			
2	N	1	f	1.036 GHz	−30.568 dBm			
3	N	1	f	3.000 GHz	−37.784 GHz			
4	N	1	f	0 Hz	−32.488 dBm			

Рис. 4. Кривые на экране спектроанализатора амплитудного спектра широкополосного СВЧ сигнала на входе в двухканальный преобразователь частоты радиофотонного АЦП (*а*) и спектры сигналов на двух его выходах после преобразования на промежуточную частоту 2 ГГц (*б*).

нии современных оптоэлектронных компонент (см. также [6, 12]). Ошибка восстановления, связанная с различием характеристик каналов, может быть уменьшена за счет предварительной калибровки системы.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДВУХКАНАЛЬНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЧАСТОТЫ РАДИОФОТОННОГО АЦП

Экспериментальные исследования макета двухканального преобразователя частоты для радиофотонного АЦП полностью подтвердили возможность деления входного СВЧ сигнала на спектральные интервалы с последующим преобразованием на промежуточную частоту. На рис. 4*а* показан цифровой снимок с экрана спектроанализатора широкополосного СВЧ сигнала с полосой частот от 14 до 18 ГГц, поступающего на вход двухканального преобразователя частоты радиофотонного АЦП. Амплитуда сигнала составляет −16 дБм. Спектры сигналов после преобразования на промежуточную частоту 2 ГГц представлены на рис. 4*б*. Здесь голубая кривая – это выходной сигнал канала, обрабатывающего левую часть спектра входного сигнала, а красная кривая – выходной сигнал, соответствующий правой части спектра. Потери преобразования составляли около 16 дБ, полоса оптических фильтров была равна 2 ГГц по уровню −3 дБ. Для выбранных оптических фильтров коэффициент пропускания спадает медленно при удалении от центральной частоты фильтра, что приводит к несимметричной форме спектров на промежуточной частоте в отличие от результатов численного моделирования (рис. 2*б*). Однако такая несимметрия не приводит к ухудшению восстановления сигнала после компьютерной обработки, т.к. при этом учитываются только области спектров в интервале от 1 до 3 ГГц, остальные части отбрасываются.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследована новая архитектура высокочастотных радиофотонных АЦП с многоканальным измерением сигнала в спектральных интервалах. Эти АЦП могут эффективно применяться при оцифровке входных сигналов с ограниченной шириной полосы. С помощью численного моделирования показано, что при использовании современных оптических элементов в оцифрованном сигнале может быть получено 8–10 эффективных бит независимо от средней частоты спектра сигнала. Проведены экспериментальные исследования макета двухканального преобразователя частоты для радиофотонного АЦП, которые полностью подтвердили возможность радиофотонного деления входного СВЧ сигнала на спектральные интервалы с последующим преобразованием на промежуточную частоту. В целом предлагаемые радиофотонные АЦП со спектрально-интервальным оцениванием оказываются для входных сигналов с ограниченной шириной полосы более эффективными, чем фотонные АЦП с обработкой последовательности временных отсчетов разными каналами.

Работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований (проект № 17-07-01411а). Авторы благодарят Д.А. Чермошенцева и М.В. Чураева за проведение численного моделирования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Capmany J., Novak D.* // Nat. Photon. 2007. V. 1. № 6. P. 319.
2. *Seeds A.J., Williams K.J.* // J. Lightwave Technol. 2006. V. 24. № 12. P. 4628.

3. *Yao J.P.* // J. Lightwave Technol. 2009. V. 27. № 3. P. 314.
4. *Valley G.C.* // Opt. Expr. 2007. V. 15. № 3. P. 1955.
5. *Ridgway R.W., Dohrman C.L., Conway J.A.* // J. Lightwave Technol. 2014. V. 32. № 10. P. 3428.
6. *Валуев В.В., Гуляев Ю.В., Конторов С.М. и др.* // Радиотехн. и электрон. 2018. Т. 63. № 9. С. 1020; *Valuev V.V., Gulyaev Yu.V., Kontorov S.M. et al.* // J. Commun. Technology. Electronics. 2018. V. 63. № 9. P. 1080.
7. *Kontorov S.M., Cherepenin V.A., Kulagin V.V. et al.* // 2018 Progr. Electromagn. Res. Symp. (Toyama, 2018). P. 967.
8. *Cherepenin V.A., Kontorov S.M., Kulagin V.V. et al.* // IEEE Conf. Publ. 48th Europ. Microwave Conf. (Madrid, 2018). P. 796.
9. *Кулагин В.В., Валуев В.В., Конторов С.М. и др.* // Тр. 28-й Междун. конф. “СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии”. (Севастополь, 2018). Т. 6. С. 1515.
10. *Sakamoto T., Kawanishi T., Izutsu M.* // Opt. Lett. 2007. V. 32. № 11. P. 1515.
11. https://optiwave.com/.
12. http://jre.cplire.ru/jre/feb15/12/text.html.