

## РАДИОФОТОНИКА

### **Формирование широкополосных СВЧ сигналов и многоканальное преобразование частоты с помощью радиофотонного генератора сетки опорных частот**

*В.В. Кулагин, В.В. Валуев, С.М. Конторов, Д.А. Прохоров, В.А. Черепенин ..... 2*

### **Определение скорости деградации мощного лазерного диода по зависимости спектра излучения от вариаций тока накачки**

*В.В. Близнюк, В.А. Паршин, А.Г. Ржанов, А.Е. Тарасов ..... 5*

### **Радиофотонный блокиратор: новый подход к сокращению времени реакции на команду радиоуправляемого взрывного устройства**

*Д.А. Фофанов, М.Е. Белкин, А.В. Алешин ..... 9*

## Формирование широкополосных СВЧ сигналов и многоканальное преобразование частоты с помощью радиотонного генератора сетки опорных частот

В.В. Кулагин<sup>1,2,3</sup>, В.В. Валуев<sup>3,4</sup>, С.М. Конторов<sup>5</sup>, Д.А. Прохоров<sup>3</sup>, В.А. Черепенин<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Государственный астрономический институт им. П.К.Штернберга МГУ им. М. В. Ломоносова

<sup>2</sup>Институт радиотехники и электроники им. В.А.Котельникова РАН

<sup>3</sup>Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ

<sup>4</sup>ЗАО НТЦ «Модуль»

<sup>5</sup>Сколковский институт науки и технологий

[victorvkulagin@yandex.ru](mailto:victorvkulagin@yandex.ru)

Современной тенденцией развития радиолокационных систем с возможностью радиовидения является обеспечение сверхвысокого разрешения по дальности за счет расширения полосы зондирующего сигнала. Формирование и обработка широкополосного СВЧ сигнала, построенная на базе традиционных электронных технологий, встречает большие затруднения. Требуемые характеристики могут быть обеспечены в радиолокационных установках, разработанных на основе радиотонных технологий. В настоящее время радиофотоника интенсивно развивается в России и за рубежом, позволяя в широкой полосе частот обеспечить быстроедействие радиотонных устройств, стабильность параметров и защищенность от внешних помех, возможность интегрально-оптической реализации и др.. В радиотонных приемных системах может использоваться многоканальное оптическое гетеродинирование. В этом случае весь спектр входного СВЧ сигнала разбивается с помощью радиотонных элементов на отдельные участки (каналы), содержащие полезную информацию [1]. Далее в каждом канале применяется радиотонный преобразователь для предварительной обработки сигнала и его трансформации на промежуточную частоту (для каждой части спектра входного сигнала СВЧ, используется своя опорная частота для гетеродинирования), а затем сигнал оцифровывается коммерческим электронным АЦП. Таким образом, вся система состоит из набора идентичных по строению приемных каналов, каждый из которых работает в своем частотном интервале, на которые разбит весь спектр входного сигнала. В некоторых случаях выходные сигналы этих каналов уже достаточны для получения необходимой информации, т.е. совместной обработки всех выходных сигналов может не потребоваться вовсе. Если требуется восстановление полного широкополосного входного сигнала в цифровом виде, то это может быть осуществлено с помощью обработки и объединения спектров сигналов из различных каналов [2,3].

Формирование широкополосных СВЧ сигналов также может быть реализовано с помощью радиотонных технологий. Здесь возможно как формирование ряда несущих частот, переключение между которыми может осуществляться программно в рабочем режиме, так и OFDM сигналов [4] (мультиплексирование с ортогональным частотным разделением каналов), которые все чаще начинают использоваться для целей зондирования [5].

Важным элементом радиотонной приемной системы на базе многоканального оптического гетеродинирования и радиотонной системы формирования широкополосных СВЧ сигналов является генератор сетки опорных частот. От стабильности частот этого генератора зависят характеристики приемной и передающей систем. Обычно в радиофотонике основой таких генераторов служат стабильные импульсные лазеры с синхронизацией мод. В частотной области спектр колебаний этих лазеров представляет собой набор равноотстоящих мод с разными частотами, которые могут выделяться с помощью гребенки оптических фильтров. В то же время

многомодовые оптические лазеры с синхронизованными модами недостаточно стабильны, дороги, и имеют длительное время выхода на рабочий режим, кроме того, возможность их интегральной оптической реализации существенно осложнена. Дополнительным недостатком их применения в зондирующих системах является слишком большое количество мод (несколько тысяч и даже десятков тысяч) и существенная неравномерность их амплитуд.

Оптический источник многомодовой накачки с требуемыми характеристиками может быть реализован с помощью схемы, включающей высокостабильный непрерывный лазер и несколько амплитудных и фазовых модуляторов с большим индексом модуляции для генерации достаточного количества боковых линий. Модулирующий сигнал поступает в этой схеме от источника СВЧ колебаний, частота которого определяет расстояние между оптическими линиями в сетке частот. В простейшем случае может быть использован только один амплитудный модулятор с двумя независимыми СВЧ входами [6]. Выделение нужных линий из оптической сетки частот осуществляется узкополосными оптическими фильтрами. С помощью фотодетектирования отфильтрованных линий формируется выходной СВЧ сигнал, максимальная частота которого кратна частоте модулирующего СВЧ колебания. Преимуществом таких систем является возможность независимо задавать среднюю частоту гребенки, определяемую частотой лазера, и расстояние между линиями в ней, которое определяется частотой модуляции. При этом шумовые характеристики гребенки зависят в основном от шумов 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 генератора.

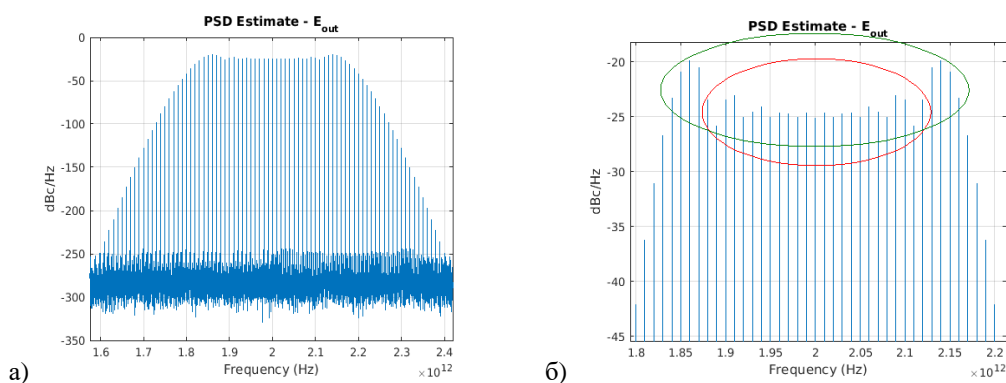


Рис. 1. Спектральная плотность выходного поля модулятора для модулирующей частоты 10 ГГц: а). общий вид спектра, б). Увеличенная верхняя часть спектра. Красным эллипсом выделены центральные линии, неравномерность амплитуд которых менее 3 дБ (25 мод), а зеленым эллипсом - мод с неравномерностью менее 6 дБ (33 моды).

В работе проведено численное исследование характеристик сетки оптических частот, формируемой в амплитудном модуляторе с двумя независимыми входами СВЧ [6]. Определены возможные источники шумов и помех в системе и их характеристики, создана математическая модель и разработан численный код с использованием пакета программ МАТЛАБ, позволяющий анализировать основные характеристики генератора сетки оптических частот. Были определены требуемые индексы модуляции в зависимости от необходимого количества формируемых линий, а также достижимая неравномерность их амплитуд. Так, на рис. 1 представлена спектральная плотность выходного поля модулятора для модулирующей частоты 10 ГГц. Индексы модуляции в

плечах равны 15 и 16.5. Красным эллипсом выделены центральные линии, неравномерность амплитуд которых менее 3 дБ (25 мод), а зеленым эллипсом - мод с неравномерностью менее 6 дБ (33 моды). Оптическая частота в моделированиях выбрана равной  $10^{12}$  Гц из-за ограниченной вычислительной мощности серверов. Также определены возможности выделения узкополосными оптическими фильтрами нужных частотных компонент и исследованы их характеристики. На рис. 2 представлены спектральные плотности сигналов на выходе фотодетектора с частотами 10 ГГц (рис. 2а) и 30 ГГц (рис. 2б). Первый из них получен при выделении двух соседних мод из сетки частот, а второй - при выделении двух мод с разностью частот 30 ГГц. Ширина линии лазера в моделированиях равна 500 кГц, мощность лазера - 40 мВт.

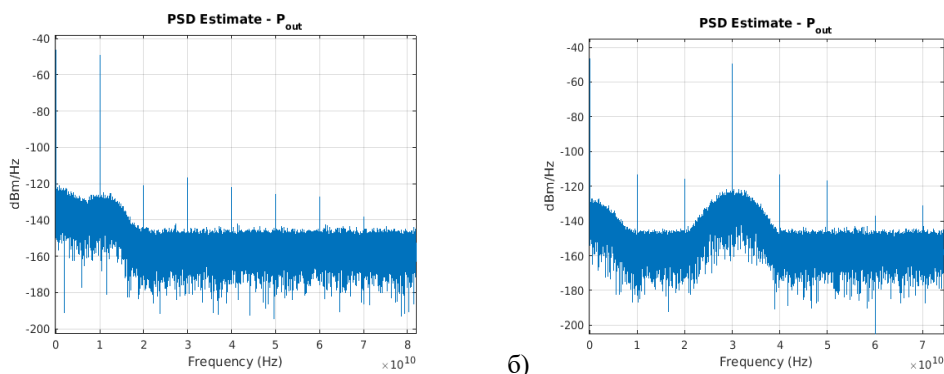


Рис. 2. Спектральная плотность сигнала на выходе фотодетектора: а). частота 10 ГГц при выделении двух соседних мод из сетки частот; б). частота 30 ГГц при выделении двух мод с разностью частот 30 ГГц из сетки частот.

Кроме того, с помощью численного моделирования показано, что частотные шумы лазера могут быть частично подавлены за счет их компенсации при преобразовании на промежуточную частоту. Также численно продемонстрирована возможность формирования модулированного СВЧ колебания при наложении модуляции на одну из линий сетки опорных частот. Для применения такого генератора в качестве источника опорных колебаний в многоканальном широкополосном приемном устройстве расстояние между линиями сетки должно соответствовать полосе пропускания электронных АЦП [1-4], а общее количество формируемых линий приблизительно равняться требуемому числу каналов. Экспериментальное исследование макета генератора сетки опорных частот показало хорошее совпадение полученных характеристик с результатами численного моделирования.

Работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований, проекты № 19-29-06108 и 20-07-00768.

## ЛИТЕРАТУРА

1. V.A. Cherepenin et al. // IEEE Conference Publications: 48th European Microwave Conference (EuMC). 2018. P. 796-799.
2. В.В. Кулагин и др. // Труды 28-й Международной конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2018), Севастополь, Россия, 9—15 сентября 2018 г. 2018. Т. 6. С. 1515-1521.
3. В.В. Кулагин и др. // Известия РАН. Сер. физическая. 2020. Т. 84. № 1. С. 67–72.
4. Н. Rohling “OFDM Concepts for Future Communication Systems” Berlin Heidelberg. Springer-Verlag, 2011.
5. J. Ellinger et al., // Radar Sonar & Navigation IET. 2017. V. 11. No 3. . P. 444-452.
6. T. Sakamoto et. al. // Optics Letters. 2007. V. 32. No 11. No 1515-1517.

## Определение скорости деградации мощного лазерного диода по зависимости спектра излучения от вариаций тока накачки

В.В. Близнюк<sup>1,\*</sup>, В.А. Паршин<sup>1</sup>, А.Г. Ржанов<sup>2</sup>, А.Е.Тарасов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>НИУ «МЭИ»

<sup>2</sup>Физический факультет МГУ имени М.В.Ломоносова

4059541@mail.ru

Полупроводниковые лазерные диоды (ЛД) с квантово-размерными гетероструктурами и мощностью непрерывной генерации от нескольких сотен милливатт до единиц ватт нашли широкое применение в разных областях науки и техники [1-5]. Важнейшим технико-экономическим параметром ЛД является срок службы. Именно поэтому разработке новых методик контроля состояния гетероструктуры ЛД и прогнозирования их срока службы, а также совершенствованию таких методик на протяжении нескольких десятилетий уделяется самое пристальное внимание.

Известны несколько методов контроля состояния мощных ЛД и прогнозирования их срока службы [6-10]. Чаще других используется классическая методика, основанная на измерении мощности излучения ЛД при постоянном значении тока накачки. Срок службы в этом случае определяется как время, через которое мощность падает до определенного, заранее установленного уровня. С измерениями мощности излучения ЛД связана и другая методика, когда полный срок наработки определяется как время, через которое поддержание мощности ЛД на постоянном уровне путем увеличения тока накачки, становится невозможным [11]. Значительно реже для прогнозирования срока службы ЛД используются методика, основанная на временной зависимости диаграммы направленности [12], и метод, основанный на анализе временных зависимостей степени линейной поляризации излучения (контраста) [13].

Реализация перечисленных выше методик связана со значительным расходом ресурса лазеров и необходимостью использования статистических методов обработки большого массива данных, полученных в результате диагностики партии приборов, изготовленных в одном технологическом цикле, что и исследуемые в настоящей работе.

Проблема определения качества отдельно взятого прибора электронной техники, каким, в частности, является ЛД, стоит особенно остро при серийном производстве изделий [14]. Определенные шаги для решения этой проблемы были сделаны в работе [10] при тестировании партии мощных ЛД, изготовленных в едином технологическом цикле. При этом учитывалось, что ранее разработанная нами методика определения состояния гетероструктуры ЛД по его спектральной характеристике может быть использована только в том случае, если имеет место режим генерации на фундаментальной моде. Для мощных ЛД характерен сложный вид огибающей спектра излучения. Поэтому анализ этого спектра с целью определения состояния гетероструктуры ЛД проводился нами путем разложения его на составляющие.

На момент начала тестирования лазеров время наработки каждого прибора варьировалось от 270 до 310 часов. В течение 40 – 80 часов с начала тестирования контур линии  $f_{\text{эксп}}(\nu)$ , огибающей спектр излучения ЛД, можно было представить как суперпозицию контуров линий  $f_{\text{расч.}i} \left( \frac{\nu - \nu_{0i}}{\Delta \nu_i} \right)$  с центральными частотами, например,  $\nu_{01} < \nu_{02} < \nu_{03}$  при трёх линиях огибающей в наблюдаемом спектре. Каждый контур соответствовал пространственному каналу генерации в активной области ЛД. Анализ

расчетных функций  $f_{\text{расч.}i} \left( \frac{\nu - \nu_{0i}}{\Delta \nu_i} \right)$  показал, что только в том случае, когда все линии генерации симметричны относительно частот  $\nu_{01}, \nu_{02}, \dots$ , выполняется условие:

$$f_{\text{эксп}}(\nu) = \sum_{i=1}^N f_{\text{расч.}i} \left( \frac{\nu - \nu_{0i}}{\Delta \nu_i} \right), \quad (1)$$

где  $N$  – число каналов (линий) генерации. Их количество в наших исследованиях изменялось от 2 до 5 по мере наработки лазера.

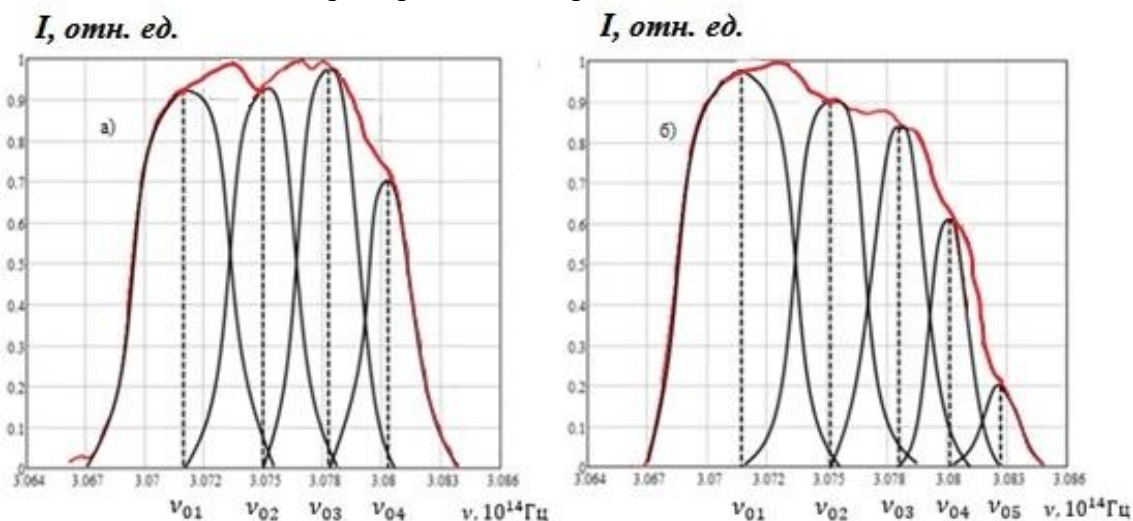


Рис. 1. Спектр излучения  $f_{\text{эксп}}(\nu)$  лазерного диода АТС-100-980 с наработкой 350 часов, при двух характерных значениях тока накачки: а)  $I_{\text{нак.1}} = 940$  мА, б)  $I_{\text{нак.2}} = 980$  мА

В процессе тестирования ЛД наблюдалось изменение формы спектральных линий ЛД  $f_{\text{эксп}}(\nu)$ , обусловленное увеличением числа каналов генерации с трех до пяти. Заключительный переход от  $N=4$  к  $N=5$  показан на рис. 1.

Такого рода изменения спектра излучения ЛД мы связываем с вариациями коэффициента нелинейной рефракции полупроводника квантовой ямы и длины когерентности излучения ЛД в каждом канале. Проведённые нами расчёты показали, что меньшее число каналов генерации соответствует большей степени когерентности излучения ЛД, а увеличение числа каналов  $N_{\text{кан}}$  означает, что длина когерентности  $L_{\text{ког}}$  излучения в каналах уменьшается [7]:

$$N_{\text{кан}} = W \sqrt{\frac{2\pi n}{\lambda_0 L_{\text{ког}}}}, \quad (2)$$

где  $n=3.56$  – эффективный показатель преломления лазерного волновода исследуемого ЛД для фундаментальной латеральной моды,  $W=100$  мкм – ширина активной области ЛД,  $\lambda_0$  – средняя длина волны излучения ЛД. В данной работе  $\lambda_0=976$  нм ( $3.075 \cdot 10^{14}$  Гц).

Далее в нашей работе приводятся результаты подробных исследований состояния структуры и темпа деградации ЛД модели АТС-100-980. В качестве контролируемого параметра используется спектральная характеристики новой партии ЛД, изготовленных по той же технологии и имеющие ту же конструкцию, что и лазеры, исследованные в [10]. Важным фактором проведения исследований является то, что время начальной наработки всех лазеров было известно точно и не превышало 10 часов. В первые несколько часов исследований у всех ЛД были зафиксированы только два канала генерации с центральными частотами  $\nu_{01}$  и  $\nu_{02}$ . Согласно (2) это означает, что излучение ЛД в начальной стадии эксплуатации характеризуется большой длиной когерентности, которая согласно (2) составляла  $L_{\text{ког}}=5.6$  см.

Через 200 – 250 часов эксплуатации ЛД возникал третий канал генерации, что означает снижение длины когерентности до величины приблизительно равной

$L_{\text{ког}}=2.5$  см. В [10] показано, что каждому каналу генерации в спектре излучения соответствует контур линии  $f_{\text{расч.}i} \left( \frac{\nu-\nu_{0i}}{\Delta\nu_i} \right)$  с центральной частотой  $\nu_{0i}$ . Поэтому появление третьего канала генерации приводит к тому, что контур линии  $f_{\text{эксп}}(\nu)$ , огибающей спектр излучения ЛД, представляет собой суперпозицию трех контуров линий  $f_{\text{расч.}i} \left( \frac{\nu-\nu_{0i}}{\Delta\nu_i} \right)$  с центральными частотами  $\nu_{01} < \nu_{02} < \nu_{03}$ .

При увеличении наработки ЛД до 350 часов при токе накачки 940 мА в спектре излучения ЛД формируется четвертый канал генерации (рис. 2а). Согласно (2) это означает, что длина когерентности излучения ЛД продолжает уменьшаться до значения  $L_{\text{ког}}=1.4$  см. Увеличение числа нефазированных каналов приводит к соответствующему увеличению числа спектральных компонентов излучения ЛД. Это связано с тем, что полоса усиления имеет довольно большую спектральную ширину (5 нм или 1.6 ТГц) и должна заполняться новыми полосами излучения, соответствующими разным каналам, вплоть до их существенного перекрытия.

Представление спектра излучения ЛД как суммы спектров излучения всех каналов генерации позволяет рассчитывать параметры качества  $A_i$  в пределах каждого канала  $f_{\text{расч.}i} \left( \frac{\nu-\nu_{0i}}{\Delta\nu_i} \right)$  по той же методике, по которой рассчитывался параметр  $A$  одномодового лазера в [9, 15]. Численный анализ функций  $f_{\text{расч.}i} \left( \frac{\nu-\nu_{0i}}{\Delta\nu_i} \right)$  осуществляется путем их сравнения с гауссовыми функциями  $f_G \left( \frac{\nu-\nu_{0i}}{\Delta\nu_i} \right)$  в пределах ширины  $i$ -ой линии спектра  $\Delta\nu_i$ . Для проведения такого анализа в пределах каждого канала генерации вводится параметр  $A_i$ , значение которого рассчитывается по формуле:

$$A_i = 1 - \int_{\nu_{1/2i}^{\min}}^{\nu_{1/2i}^{\max}} \left( \frac{\left| D \left( \frac{\nu - \nu_{0i}}{\Delta\nu_i} \right) - 1 \right|}{\Delta\nu_i} \right) d\nu \quad (3)$$

где  $\nu_{1/2i}^{\max}$  и  $\nu_{1/2i}^{\min}$  – частоты, которые определяются из условия:

$$\begin{aligned} f_{\text{расч.}i} \left( \nu_{1/2i}^{\min} \right) &= f_{\text{расч.}i} \left( \nu_{1/2i}^{\max} \right) = \\ &= f_G \left( \nu_{1/2i}^{\min} \right) = f_G \left( \nu_{1/2i}^{\max} \right) = 0.5, \end{aligned} \quad (4)$$

и

$$D \left( \frac{\nu - \nu_{0i}}{\Delta\nu_i} \right) = \frac{f_{\text{расч.}i} \left( \frac{\nu - \nu_{0i}}{\Delta\nu_i} \right)}{f_G \left( \frac{\nu - \nu_{0i}}{\Delta\nu_i} \right)}, \quad (5)$$

где  $\nu_{0i}$  – центральная частота  $i$ -го диапазона частот  $\Delta\nu_i$ , в котором сравниваются гауссова функция  $f_G \left( \frac{\nu - \nu_{0i}}{\Delta\nu_i} \right)$  и функция  $f_{\text{расч.}i} \left( \frac{\nu - \nu_{0i}}{\Delta\nu_i} \right)$ .

Особенностью проводимых в рамках настоящей работы исследований является то, что линии, огибающие спектр излучения ЛД, с центральными частотами  $\nu_{0i}$  анализируются при фиксированных значениях времени наработки лазера в относительно широком диапазоне значений тока накачки: от 940 до 980 мА. Выбор этого диапазона обусловлен тем, что в его границах наблюдается значительная трансформация спектра излучения ЛД. На рис. 2. приведены спектральные линии излучения ЛД со временем наработки 350 часов при двух характерных значениях тока накачки: 940 и 980 мА. При токе накачки 940 мА наблюдаются 4 канала генерации, а при токе накачки 980 мА – уже 5 каналов. Численный анализ функций  $f_{\text{расч.}i} \left( \frac{\nu - \nu_{0i}}{\Delta\nu_i} \right)$  при

значениях  $i = 1, 2, 3$  и  $4$ , то есть во всех четырех каналах генерации показывает, что соответствующие расчётные значения  $A_i$  лежат в интервале от  $0,93$  до  $0,95$ . Из этого следует, что режим генерации излучения в каждом канале близок к одномодовому, а многомодовый пучок излучения можно представить как одновременную генерацию нефазированных одномодовых пучков.

Таким образом, можно сделать вывод, что по мере увеличения числа каналов генерации будет возрастать степень расфазировки отдельных областей лазерного пучка, что есть следствие уменьшения длины когерентности излучения в каждом канале ЛД. Таким образом, в качестве критерия деградации конкретного лазера целесообразно использовать наблюдаемое число каналов генерации, о котором можно судить по числу линий в измеренном спектре излучения ЛД.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. А. П. Богатов и др. // Квантовая электроника. 2000. Т.30. № 5. С. 401.
2. С. О. Слипченко и др // ФТП. 2009. Т. 43. № 1. С. 119.
3. С. О. Слипченко и др // ФТП 2004. Т. 38, № 12. С. 1477.
4. А. В. Лютецкий и др. // ФТП. 2009. Т. 43. № 12. С. 1646.
5. А.Е.Жуков. "Физика и технология полупроводниковых наноструктур". СПб.: "Элмор". 2007. 304 с .
6. Л. Воробьев и др. // Фотоника. 2012. Т.31. №4. С. 20.
7. В. В. Близнюк и др. // Изв. РАН. Сер. физ. 2015. Т. 79. № 12. С. 1666.
8. В. В. Близнюк и др. // УЗФФ МГУ. 2018. № 6. С. 1860501.
9. В.В. Близнюк и др. // Изв. РАН. Сер. физ. 2018. Т. 82. № 11. С. 1504.
10. V.V. Bliznyuk et al. // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. Allerton Press Inc. (United States). V. 84. N. 2. 2020. P.173.
11. Л. Кейси, М. Паниш. "Лазеры на гетероструктурах". М.: "Мир". 1981. Т.2– 299 С.
12. Д.Р. Мифтахутдинов и др. // Квантовая электроника. 2010. №7. С.583.
13. В.В. Близнюк и др. // Сборн. докл. 22 междунар. конф. " Лазеры. Измерения. Информация. 2012 ". СПб.: Изд-во Политехн. ун-та. 2012. С.224.
14. В.Г. Сидоров и др. // Научно-техн. ведомости СПбГПУ. Физ.-мат. науки. 2013. №2(170). С.71.
15. V.V. Bliznyuk et al. // Physics of Wave Phenomena. 2017.V. 25. N. 3. P.214.



## Радиотонный блокиратор: новый подход к сокращению времени реакции на команду радиуправляемого взрывного устройства

Д.А. Фофанов, М.Е. Белкин, А.В. Алешин  
МИРЭА - Российский технологический университет  
[fofanov@mirea.ru](mailto:fofanov@mirea.ru)

В настоящее время проблема эффективного противодействия террористическим атакам, осуществляемым с применением управляемых по радиоканалу самодельных взрывных устройств (СВУ) остро стоит практически во всех странах мира [1]. Для ее оперативного решения в ряде промышленно развитых стран, включая Российскую Федерацию, созданы соответствующие органы и организации и налажен промышленный выпуск блокираторов радиовзрывного устройства (БРВУ). Кратко охарактеризуем современное состояние и уровень их развития.

Для дистанционного управления детонатором заложенного на объекте взрывчатого вещества (ВВ) различными террористическими группировками и индивидуальными террористами, как правило, используются СВУ, действующие в сверхширокополосном диапазоне 20-2700 МГц, охватывающем более 7 октав. При этом для передачи кода подрыва обычно используются либо радиостанции типа «Уоки-Токи» любительских диапазонов (20 МГц-1,3 ГГц), либо доработанные сотовые телефоны (смартфоны), работающие в целом ряде стандартов радиосвязи, как например, CDMA-450 (463-467,5 МГц) EGSM (925-935 МГц), GSM-900 (925-960 МГц), GSM (DCS)-1800 (1805-1880 МГц), UMTS-2100 (2110-2170 МГц), 4G LTE (791-862 МГц, 2500-2690 МГц). Кроме того, в связи с бурным развитием в мире мобильных телекоммуникационных сетей 5-го поколения (5G) в ближайшее время ожидается расширение диапазона их работы до 6 ГГц, что необходимо учитывать при разработке средств противодействия нового поколения.

Для противодействия им отечественными и зарубежными производителями выпускаются БРВУ в носимом, возимом, стационарном и универсальном исполнениях, назначение которых состоит в обнаружении и подавлении радиосигнала с кодом подрыва. В общем, современные БРВУ подразделяются по принципу работы на два типа: активные, которые постоянно излучают, так называемую, заградительную помеху во всем диапазоне рабочих частот, и реактивные, которые сканируют радиоэфир и выдают, так называемую, прицельную помеху в заданной полосе частот, только если они обнаружат передачу радиосигнала в этой полосе. Первый тип – более экономичный, однако его важным недостатком является создание помех не только подавляемому взрывному радиоустройству, но и всем устройствам сотовой связи в радиусе нескольких километров, поэтому они неприменимы в большом городе. Второй тип, вследствие избирательных свойств получил более широкое распространение.

Примерами основных реактивных БРВУ отечественного производства являются изделия GRIPHON, Пелена, Персей, Вулкан, Штиль [2], среди большого числа зарубежных производителей БРВУ наиболее продвинутыми считаются фирмы Selex, Англия (Guardian), Thales, Франция, NEC, Япония. Также в разработках новых усовершенствованных моделей БРВУ активно участвуют исследовательские университеты: Universität der Bundeswehr, München, ФРГ, Institute IRITEL, Сербия, Tampere University of Technology, Финляндия и др. Проведенный нами анализ, позволяет сделать следующие выводы относительно современного уровня развития радиоэлектронных БРВУ.

а) Все, как серийно выпускаемые, так и разрабатываемые модели построены на базе традиционного чисто радиоэлектронного подхода.

б) К общим принципиальным недостаткам существующих БРВУ можно отнести следующие:

1) Необходимость частотного сканирования в указанном выше сверхширокополосном частотном диапазоне результатов приема кода подрыва, что приводит к относительно невысокой скорости реакции устройства.

2) Необходимость компьютерного управления для хранения и дополнительного введения в принятые сигналы маскирующей шумовой помехи из библиотеки оптимальных помех, что также уменьшает скорость реакции.

3) Сложность схемы, что приводит к ухудшению массогабаритных характеристик и увеличению стоимости изделия.

Анализ литературных данных позволяет определить обобщенную структурную схему современного БРВУ, которая представлена на рис.1.

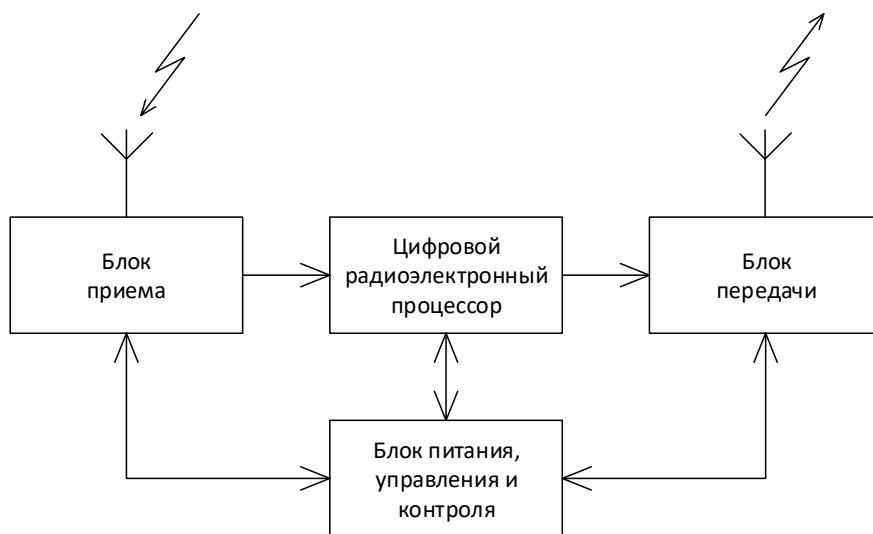


Рис. 1. Обобщенная структурная схема современного БРВУ на основе радиоэлектронного подхода.

Как следует из рисунка, основными составными элементами современного полностью радиоэлектронного БРВУ являются: блок приема, обычно содержащий приемную антенну и предварительный малошумящий усилитель (МШУ), цифровой радиоэлектронный процессор (ЦРП), основные функции которого состоят в сканировании рабочего диапазона частот и во введении заградительной шумовой помехи во все каналы рабочего диапазона в БРВУ активного типа либо в предварительном анализе активных радиоканалов с сигналами на выходе МШУ и введении прицельной шумовой помехи только в них в БРВУ реактивного типа, блок передачи, обычно содержащий усилитель мощности (УМ) и передающую антенну. Все узлы вышеуказанных блоков и ЦРП связаны с блоком питания, управления и контроля, работающим под управлением встроенного либо внешнего персонального компьютера (ПК).

В настоящей статье предлагается новое решение, позволяющее помимо упрощения схемы полностью радиоэлектронного БРВУ, которая построена на базе многоканального блока приема, на порядок увеличить скорость его реакции. Данный подход основывается на замене ЦРП на сверхширокополосный оптоэлектронный процессор (ОЭП) при сохранении в неизменном виде остальных блоков рис. 1.

Структурная схема предложенного ОЭП представлена на рис. 2. Как следует из рисунка, основными элементами схемы являются электрооптический и оптико-электрический преобразователи (ЭОП и О-ЭП), с помощью которых осуществляется прямой и обратный перенос принятого радиосигнала в оптический диапазон, и

расположенная между ними пассивная оптическая схема задержки (ОСЗ), с помощью которой осуществляется соответствующая обработка в оптическом диапазоне с целью создания интерференции с исходным радиосигналом так, чтобы ухудшить его качество настолько, чтобы после обратного О-ЭП и передачи в эфир он не мог быть распознан установленным на детонаторе ВВ радиоприемным устройством. Предложенная схема имеет очень простую и хорошо известную реализацию. В частности, в качестве ЭОП и О-ЭП в системах волоконно-оптической связи стандартно используются полупроводниковые лазерный и фотодетекторный модули (ПЛМ и ФДМ) с соответствующей верхней частоте рабочего диапазона БРВУ полосой пропускания. Эффективность функционирования ОСЗ на базе простой пассивной схемы, содержащей стандартное одномодовое оптическое волокно определенной длины либо их набор, была ранее подтверждена нами, как для обработки (создания копий) импульсных радиосигналов [3], так и для ретрансляции цифровых телекоммуникационных радиосигналов [4].

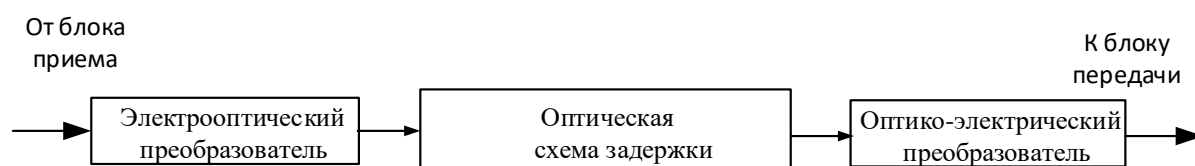


Рис. 2. Структурная схема предложенного оптоэлектронного процессора.

В ходе исследований была разработана схема ОЭП с полосой 20 МГц – 6 ГГц, включающая всего три элемента: серийно выпускаемые ПЛМ и ФДМ и ОСЗ на базе оптической рециркуляционной петли, содержащей стандартное одномодовое волокно SMF-28 длиной менее 1 км. Для подтверждения возможности и эффективности реализации БРВУ на базе ОЭП проведено моделирование схемы в широко известной специализированной системе автоматизированного проектирования VPI Photonics Design Suite при подаче на вход БРВУ реальных цифровых радиосигналов современных стандартов сотовой связи и определении ухудшения качества сигнала на выходе БРВУ по стандартным критериям цифровой связи: коэффициенту битовой ошибки (BER) и магнитуде вектора ошибки (EVM). В результате моделирования определены оптимальные параметры ОЭП, по которым изготовлен и предварительно испытан макет устройства. Результаты лабораторных и полунатурных испытаний макета показали надежность блокирования канала радиосвязи с временем реакции менее 1 мкс.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования России (шифр проекта RFMEFI60719X0319).

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Global Terrorism Index 2019. Measuring the Impact of Terrorism <http://visionofhumanity.org/app/uploads/2019/11/GTI-2019web.pdf>
2. <https://pro-spec.ru/catalog/blokiratory-radioupravlyaemykh-vzryvnykh-ustrojstv>
3. M.E. Belkin et al. // International Journal of Engineering Research and Development. 2019. V. 15. No. 3. P. 58-69.
4. M.E. Belkin, T. Bakhvalova, and A.C. Sigov // Design Principles of 5G NR Based Fiber-Wireless Access Network. Chapter to IntechOpen Book “Recent Trends in Communication Networks”. 2019. <https://www.intechopen.com/online-first/design-principles-of-5g-nr-rof-based-fiber-wireless-access-network>