

Акустооптический спектрально-временной анализатор

*А. Р. Гасанов, Р. А. Гасанов, А. Р. Рустамов, Р. А. Ахмедов,
И. И. Сулейманов, М. В. Садыхов*

Акцентируется высокое научно-практическое значение проблемы быстрого обнаружения и измерения параметров радиосигналов в широкой полосе частот. Оцениваются особенности дифракции Брэгга в контексте синтеза мелкомасштабного быстродействующего измерителя радиочастот. Обсуждается схема измерителя радиочастот, которая составлена на основе дифракции Брэгга. Проводится схемно-математическое моделирование алгоритма функционирования предложенного устройства. Доказывается возможность реализации многоканального приема радиоимпульсов путем подбора углов падения оптических пучков в апертуру фотоупругой ячейки, что позволяет использовать широкую полосу рабочих частот акустооптического модулятора в полном объеме. Сформулированные утверждения апробируются численными экспериментами. Результаты схемно-математического моделирования и расчетов натурно исследуются. Некоторые результаты натурных экспериментов приводятся в виде таблицы и осциллограмм, которые обсуждаются в контексте мелкомасштабного частотного анализа в заданном диапазоне.

Ключевые слова: радиоимпульс, дифракция Брэгга, измеритель радиочастоты, схемно-математическое моделирование, многоканальный прием, акустооптический модулятор.

DOI: 10.51368/1996-0948-2022-2-62-71

Введение

Обнаружение радиоволн и измерение их частоты является важной научно-технической задачей в радиоэлектронной борьбе. Известны

различные методы и средства измерения частоты радиоволн. Выбор того или другого метода определяется требованиями к точности и быстродействию измерений [1, 2]. Эти противоречивые требования оптимизируются в зависимости от характера решаемой задачи. Во всех случаях, чем выше точность измерения тем ниже быстродействие. В некоторых случаях, например в радиолокационных системах военного назначения, быстрое обнаружение и измерение частоты радиоволн имеет важное, а в некоторых случаях жизненно необходимое значение. В контексте решения данной проблемы метод параллельного частотного анализа обладает высоким потенциалом [3]. Однако аппаратная реализация этого метода достаточно сложна [4].

Мелкомасштабный спектрально-временной анализ заданного диапазона частот в некоторой мере сохраняет достоинства параллельного частотного анализа и обеспечивает достаточно высокое быстродействие. Суш-

Гасанов Афиг Рашид оглы, д.т.н. профессор.

E-mail: afig.gasanov.51@mail.ru

Гасанов Руслан Афиг оглы, д.т.н. доцент.

E-mail: ruslan-icq@mail.ru

Рустамов Асад Рустам оглы, к.т.н., профессор.

E-mail: asad-rustam@mail.ru

Ахмедов Ровшан Аррахман оглы, докторант.

E-mail: rovshan.ahmadov96@list.ru

Сулейманов Ильгар Инглаб оглы, старший преподаватель.

E-mail: s_ilgar@mail.ru

Садыхов Масуд Вугар оглы, докторант.

E-mail: sadiqovm.1999@gmail.com

Национальная Академия Авиации Азербайджана.

Азербайджан, AZ1045, г. Баку, проспект Мардакан, 30.

Статья поступила в редакцию 14 февраля 2022 г.

© Гасанов А. Р. Гасанов Р. А., Рустамов А. Р.,
Ахмедов Р. А., Сулейманов И. И., Садыхов М. В., 2022

ность этого метода заключается в следующем: Диапазон неопределенности одновременно просматривается настроенными на различные частоты полосовыми фильтрами. При этом, частотное разрешение измерителя определяется полосой пропускания одного полосового фильтра. Сигналы с выходов полосовых фильтров детектируются и последовательно коммутируются на временную ось (выводятся на экран осциллографа). Следует учитывать, что быстрая коммутация сопровождается переходными процессами, которые следует подавлять. Быстродействие измерителя в данном случае определяется временем коммутации. Очевидно, что увеличением числа полосовых фильтров можно обеспечить высокое частотное разрешение и реализовать крупномасштабный анализ диапазона неопределенности. Однако при этом усложняется структура измерителя и уменьшается быстродействие.

Обобщая вышеизложенные доводы можно постулировать, что фильтрация, детектирование, коммутация на временную ось и подавление переходных процессов являются основными операциями в алгоритме спектрально-временного анализа.

В [5, 6] обсуждаются некоторые методы и средства спектрально-временного анализа частотного диапазона неопределенности. Для решения проблемы в статье [5] используют последовательно сканируемый гетеродинный луч. В работе [6] для этой цели применяют перекрестную фазовую модуляцию в высоконеинейном волокне для переноса спектра радиосигнала в оптический диапазон, где осуществляется анализ в реальном масштабе времени с помощью технологии параметрического спектрально-временного анализатора. Очевидно, что в обеих случаях присутствуют элементы последовательного частотного анализа. К тому же предложенные в этих работах средства измерения относительно узкополосные (полоса рабочих частот ограничивается характером используемых физических процессов), достаточно сложны в изготовлении и нуждаются в особой наладке.

В контексте синтеза широкополосных спектроанализаторов дифракция Брэгга обладает высоким потенциалом [7]. В книге [8] обсуждаются различные варианты акустоопти-

ческих спектроанализаторов на основе дифракции Брэгга. Полоса рабочих частот этих устройств ограничивается резонансным углом Брэгга и потенциальные возможности фотоупругого эффекта реализуются не в полном объеме [9].

Целью данной работы является синтез быстродействующего широкополосного спектрально-временного анализатора, в котором операции фильтрация, детектирование, коммутация на временную ось и подавление переходных процессов реализуются на основе особенностей дифракции Брэгга.

Дифракция Брэгга и ее особенности

Дифракция Брэгга [10] реализуется в акустооптическом модуляторе (АОМ), в котором обрабатываемый электрический сигнал с несущей частотой f преобразуется электроакустическим преобразователем (ЭАП) в акустическую волну с частотой f , которая распространяется в фотоупругой среде (ФУС) со скоростью v , примерно в 10^5 раз меньшей скорости распространения электромагнитной волны (рис. 1). При этом, излучение лазера с длиной волны λ падает в апертуру АОМ под углом Брэгга θ_B , который определяется по формуле

$$\theta_B = \arcsin(0,5\lambda/\Lambda), \tag{1}$$

где $\Lambda = v/f$ – длина акустической волны.

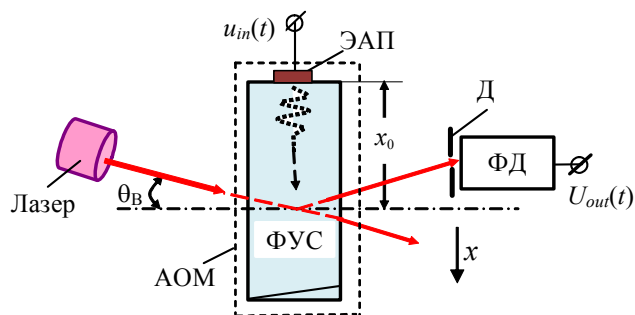


Рис. 1. Дифракция Брэгга

В результате дифракции Брэгга часть светового пучка отклоняется и через отверстие в диафрагме (Д) падает на светочувствительную поверхность фотодетектора (ФД).

Сигнал на выходе фотодетектора $U_{out}(t)$ с точностью до постоянного множителя c соответствует задержанной на время $\tau = x_0/v$ огибающей входного сигнала $u_{in}(t) = U_{in}(t)\sin(2\pi ft)$, т. е.

$$U_{out}(t) = c \times U_{in}(t - \tau), \quad (2)$$

где x_0 – расстояние от ЭАП до точки акустооптического взаимодействия (рис. 1).

Последовательность физических процессов в алгоритме функционирования устройства на рис. 1 обеспечивает возможность регулировки времени задержки τ в достаточно широких пределах за счет низкой скорости распространения упругой волны в ФУС, путем изменения расстояния от ЭАП до точки акустооптического взаимодействия. При регулировке времени задержки необходимо учитывать следующие ограничительные факторы: а) должно сохраняться строго фиксированное положение ФД по отношению к падающему в апертуру АОМ лучу лазера; б) эффективное акустооптическое взаимодействие происходит лишь в определенном интервале углов между направлениями распространения упругой волны и луча лазера.

Из анализа ограничительных факторов применительно к схеме на рис. 1 следует, что для выбранного угла падения луча лазера в апертуру АОМ ширина полосы рабочих частот устройств этого класса лимитируется резонансным углом Брэгга.

Вышеизложенные особенности дифракции Брэгга используются для синтеза мелкомасштабного спектрально-временного анализатора радиосигналов, в котором сохраняются достоинства параллельного частотного анализа и обеспечивается высокое быстродействие.

Схемно-математическое моделирование

Широкополосность АОМ является основой для синтеза мелкомасштабного быстродействующего измерителя радиочастоты. Возможная ширина диапазона просматриваемых радиочастот выбирается равной ширине полосы рабочих частот АОМ. Выбранный

диапазон радиочастот подразделяется на M поддиапазонов, что предполагает формирование M пучков когерентного света, которые падают в апертуру АОМ под соответствующими углами Брэгга. Очевидно, что в этих условиях число поддиапазонов определяется длиной фотоупругой ячейки, а ширина каждого канала приема ограничивается резонансным углом Брэгга.

Схема спектрально-временного анализатора на основе дифракции Брэгга изображена на рис. 2. В этом устройстве M пучков когерентного света пересекают апертуру ФУС на различных расстояниях x_{0m} от ЭАП под различными углами Брэгга θ_{Bm} . Отметим, что пучки когерентного света могут быть сформированы от излучения одного лазера с помощью зеркал, или же для этой цели можно использовать набор (линейку) полупроводниковых лазеров.

В соответствии с новыми условиями многоканального приема формула (1) трансформируется в следующий вид:

$$\theta_{Bm} = \arcsin(0,5\lambda f_m/v), \quad (3)$$

где f_m – центральная частота m -го канала приема, который образуется падающим в апертуру АОМ на расстоянии x_{0m} от ЭАП под углом θ_{Bm} пучком когерентного света.

Из выражения (3) находим формулу для центральной частоты m -го канала приема в следующем виде

$$f_m = 2\theta_{Bm}v/\lambda. \quad (4)$$

При выводе формулы (4) функция \arcsin опускается из-за малого аргумента.

Отметим, что средняя частота m -го канала приема выбирается равной средней частоте m -го поддиапазона.

Формула (4) позволяет постулировать, что путем подбора угла Брэгга можно организовать канал приема с желаемой центральной частотой в пределах диапазона рабочих частот АОМ, который составляет 40–60 процентов от величины его центральной частоты.

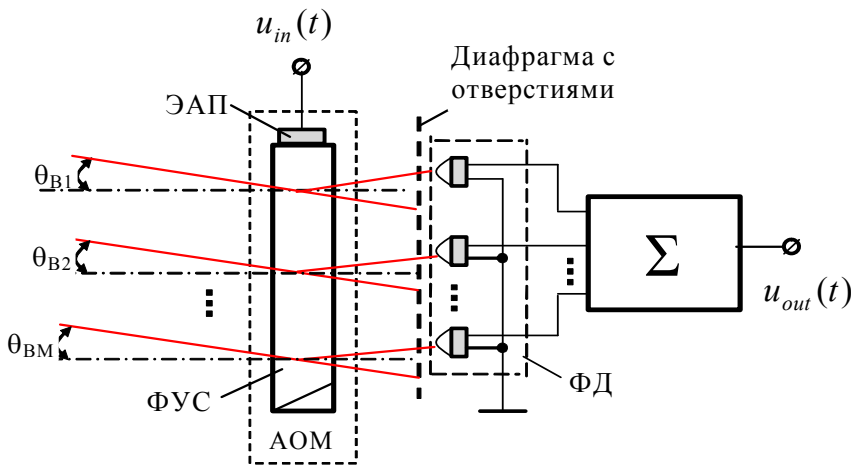


Рис. 2. Схема акустооптического спектрально-временного анализатора

Радиочастотные колебания подводятся к клеммам ЭАП, который возбуждает в ФУС упругие волны. Допустим, что входной сигнал $u_{in}(t)$ представляет собой сумму M радиоимпульсов с различными частотами и с одинаковой длительностью τ_i , т. е.

$$u_{in}(t) = \sum_{m=1}^M U_{in.m}(t) \sin(2\pi f'_m t) \times [\sigma(t) - \sigma(t - \tau_i)], \quad (5)$$

где $U_{in.m}(t)$ и f'_m – огибающая и несущая частота m -го радиоимпульса соответственно, $\sigma(t)$ – единичная функция Хевисайда.

В соответствии с вышесформулированными утверждениями можно написать следующую формулу для напряжения на выходе сумматора:

$$u_{out}(t) = c \times \sum_{m=1}^M U_{in.m}(t - \tau_m), \quad (6)$$

где $\tau_m = x_{0m}/v$ – время задержки m -го видеоимпульса, который является задержанная на время τ_m огибающей m -го радиоимпульса с несущей частотой f'_m .

При этом m -й видеоимпульс на выходе сумматора $u_{out.m}(t) = cU_{in.m}(t - \tau_m)$ формируется только в том случае, если в полосе частот $f_m - \delta f \div f_m + \delta f$ имеется некоторый радиосигнал с несущей частотой f'_m . Здесь $2\delta f$ частотное разрешение спектрально-временного анализатора. Такой алгоритм работы устройства в среде Mathcad реализуется с помощью функции if следующим образом:

$$u_{out}(t) = \sum_{m=1}^M if \left(\begin{matrix} f_m - \delta f < f'_m < f_m + \delta f, \\ c \times U_{in.m}(t - \tau_m), 0 \end{matrix} \right). \quad (7)$$

Мелкомасштабный анализ предполагает формирование ответа на вопрос: есть в рассматриваемом поддиапазоне радиоимпульс или нет? Другими словами, нужен только признак о наличии радиосигнала в полосе частот $f_m - \delta f \div f_m + \delta f$. Поэтому выражение (7) удобнее представить в следующей форме:

$$u_{out}(t) = \sum_{m=1}^M if \left(\begin{matrix} f_m - \delta f < f'_m < f_m + \delta f, \\ \sigma(t - \tau_m) - \sigma(t - \tau_i - \tau_m), 0 \end{matrix} \right).$$

Также следует отметить, что сохранение в последней формуле точного значения τ_i не является обязательным условием и оно может быть адаптировано к процессу измерения в соответствии с параметрами проектируемого изделия.

Подавление переходных процессов

Переходные процессы – это реакция исследуемого объекта на высокочастотные составляющие входного воздействия. Они могут быть причиной ошибочных измерений и ложных срабатываний [11, 12].

Подавление переходных процессов является одной из основных операций в алгоритме функционирования спектрально-временного анализатора. В случае использования свойств дифракции Брэгга оно осуществляется характером акустооптического взаимодействия, который детализируется следующим образом.

Прямоугольный радиоимпульс с длительностью τ_i возбуждает в ФУС прямоугольный акустический волновой пакет с длительностью τ_i , который входит в оптический пучок и выходит из него с относительно низкой скоростью v . В результате взаимодействия акустического волнового пакета с оптическим пучком на выходе фотодетектора формируется квазипрямоугольный видеоимпульс. Такая трактовка акустооптического взаимодействия диктует необходимость представления выражения (2) в следующей форме:

$$U_{out}(t) = c \left[g(t - \tau) - g(t - \tau_i - \tau) \right], \quad (8)$$

где $g(t)$ – переходная характеристика акустооптического модулятора.

По материалам статьи [13] уравнение для переходной характеристики АОМ имеет следующий вид:

$$g(t) = \frac{8}{\pi(d/v)^2} \times \int_{\tau}^t \sqrt{(d/v)(\xi - \tau) - (\xi - \tau)^2} d\xi, \quad (9)$$

при $\tau \leq t \leq \tau + d/v$,

где d – диаметр светового пучка.

Из анализа (9) следует, что переходные характеристики каналов приема измерителя на рис. 2 одинаковы и формируются отношением d/v , т. е. временем вхождения упругого волнового пакета в оптический пучок.

Учитывая выражение (8) в формуле (6) получаем следующее уравнение для выходного напряжения сумматора:

$$u_{out}(t) = c \times \sum_{m=1}^M \left[g(t - \tau_m) - g(t - \tau_i - \tau_m) \right]. \quad (10)$$

Из сравнения формул (6) и (10) следует, что на выходе сумматора на рис. 2 формируется последовательность не прямоугольных импульсов, а квазипрямоугольных импульсов с пологими фронтами. Время нарастания (спада) этих импульсов определяется отношением d/v . Именно этот параметр определяет степень сглаживания переходных процессов, возникающих при переносе откликов фотодетекторов на временную ось.

Численный эксперимент

Примем, что исследуемый диапазон неопределенности лежит в пределах частот от $f_{min} = 70$ МГц до $f_{max} = 90$ МГц. Также примем, что частотное разрешение спектрально-временного анализатора составляет $2\delta f = 4$ МГц. При этом число каналов приема составит $M = (f_{max} - f_{min})/2\delta f = 5$. Соответственно просмотр осуществляется в полосах частот 70–74 МГц, 74–78 МГц, 78–82 МГц, 82–86 МГц и 86–90 МГц. Условия Брэгга выполняются на центральных частотах указанных каналов: т. е. для первого луча – на частоте 72 МГц, для второго луча – на частоте 76 МГц, для третьего луча – на частоте 80 МГц, для четвертого луча – на частоте 84 МГц, а для пятого луча – на частоте 88 МГц. Для простоты будем считать, что выполняется равенство $f'_m = f_m$, т. е. на вход спектрально-временного анализатора одновременно поступают пять радиоимпульсов с частотами 72 МГц, 76 МГц, 80 МГц, 84 МГц и 88 МГц. Причем, длительности всех радиоимпульсов одинаковы и равны 1 мкс. Вычисленная и построенная в системе Mathcad по формуле (5) временная диаграмма суммарного сигнала на входе спектрально-временного анализатора приведена на рис. 3.

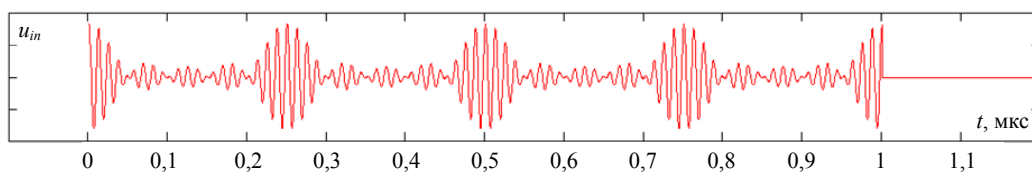


Рис. 3. Временная диаграмма суммарного сигнала на входе спектрально-временного анализатора

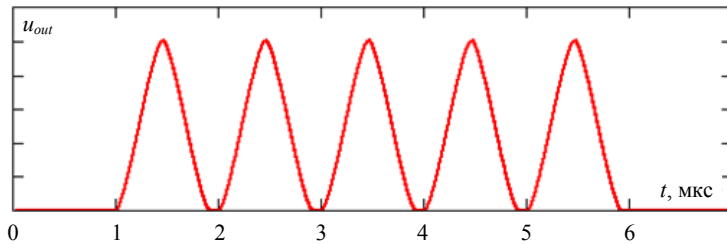


Рис. 5. Реальная временная диаграмма сигнала на выходе сумматора

Таким образом, результаты численных экспериментов однозначно подтверждают возможность проведения быстрого спектрально-временного анализа радиоимпульсов в заданном диапазоне частот благодаря использованию особенностей дифракции Брэгга. В то же время АОМ является широкополосным устройством с большой временной апертурой. Временная апертура может достигать нескольких десятков микросекунд. Следовательно, можно организовать большое число каналов приема и проводить спектрально-временной анализ радиоимпульсов в достаточно широкой полосе частот.

Лабораторный эксперимент

Схемно-математическое моделирование мелкомасштабного быстродействующего спектрально-временного анализатора на основе дифракции Брэгга показало его способность обеспечивать лучшие, по сравнению с известными аналогами, характеристики, что было подтверждено соответствующими численными экспериментами. Результаты схемно-математического моделирования и численного эксперимента апробированы на лабораторном стенде. Макет одноканального спектрально-временного анализатора для экспериментальных исследований построен по схеме, приведенной на рис. 6. Там же показана применявшаяся измерительная аппаратура. В измерениях многоканальность имитируется одновременным изменением координаты акустооптического взаимодействия и угла Брэгга.

В качестве источника когерентного света использован полупроводниковый лазер. При этом, когерентный свет с длиной волны $\lambda = 0,63$ мкм падает в апертуру АОМ под соответствующим углом Брэгга. В экспериментах использован, выполненный на стеклообразном фотоупругом материале ТФ-7 ($v = 3,63$ км/с), акустооптический модулятор с центральной

частотой 80 МГц. Сформированный в генераторе Г5-54 видеоимпульс с длительностью 1 мкс синхронизирует осциллограф MSO4052 и модулирует высокочастотное колебание генератора Г4-107, который работает в режиме внешней импульсной модуляции.

Однокаскадный широкополосный усилитель (ШПУ) (лабораторный вариант) на транзисторе типа BFG591 усиливает сигнал с выхода Г4-107 до необходимого уровня. В экспериментах используется лабораторный вариант фотоприемного устройства (ФПУ), которое выполнено на матрице лавинных фотодиодов типа MAPD 3N [14].

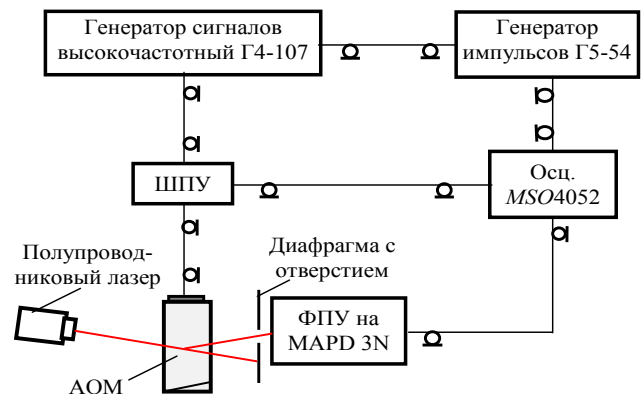


Рис. 6. Схема макета для экспериментальных исследований акустооптического спектрально-временного анализатора

В измерениях путем изменения частоты генератора Г4-107 реализуются три значения времени задержки импульса длительностью 1 мкс от генератора Г5-54. Измерения проводятся в следующей последовательности. Сначала генератор Г4-107 настраивается на частоту 75 МГц. Затем путем подстройки углового положения лазера по максимуму интенсивности отклоненного света устанавливается режим дифракции Брэгга. После чего механическим перемещением АОМ против направления распространения упругой волны устанавливается задержка импульса на выходе

ФПУ в 1 мкс. На втором этапе устанавливается задержка импульса на выходе ФПУ в 3 мкс. Затем генератор Г4-107 перестраивается на частоту 80 МГц. После чего, путем подстройки лазера по максимуму интенсивности отклоненного света, устанавливается режим дифракции Брэгга. Измерение на третьем этапе проводится аналогичным образом.

Значения частот генератора Г4-107 и соответствующие им времена задержки τ видеоимпульса от генератора Г5-54 приведены в таблице.

Таблица

Частота генератора Г4-107, f , МГц	75	80	85
Время задержки видеоимпульса от генератора Г5-54, τ , мкс	1	3	5

Из данных таблицы следует, что изменение частоты радиоимпульса на входе мелко-масштабного быстродействующего измерителя радиочастот сопровождается соответствующим

изменением времени задержки видеоимпульса на его выходе. Как было отмечено ранее, на практике причинно-следственный анализ проводится в обратном порядке, т.е. появление на выходе измерителя видеоимпульса с задержкой на 1 мкс трактуется как наличие радиоимпульса с частотой 75 МГц на входе и т. д.

Осциллограммы радиоимпульса с частотой 80 МГц и длительностью 1 мкс на входе АОМ и видеоимпульса с длительностью 1 мкс на выходе ФПУ приведены на рис. 7. Здесь видеоимпульс длительностью в 1 мкс (определяется на уровне 0,5 от максимального значения) задержан относительно входного радиоимпульса примерно на 3 мкс.

Обусловленные переходными процессами помехи на осциллограмме импульса на выходе ФПУ (рис. 7, 2) не наблюдаются. Эти помехи не появляются из-за специфических особенностей акустооптического взаимодействия, что было обосновано выше.

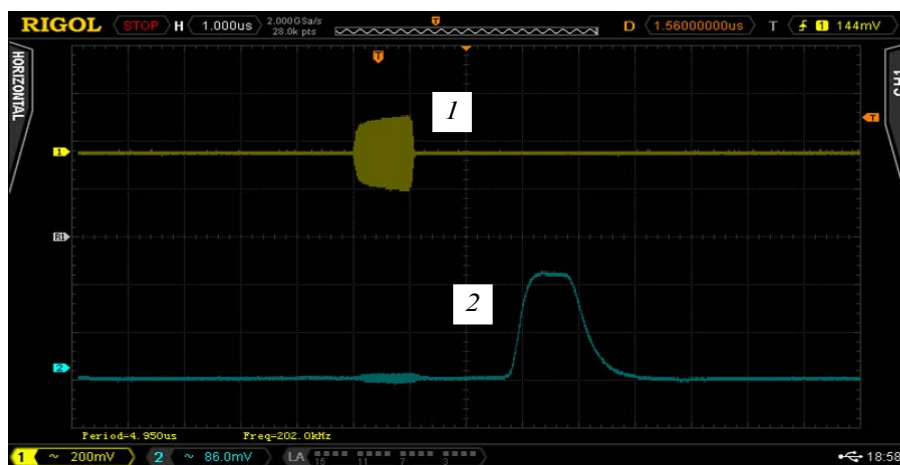


Рис. 7. Осциллограммы импульсов на входе АОМ (1) и на выходе ФПУ (2)

По осциллограмме на рис. 7, 2 определяется длительность времени формирования переднего фронта импульса на выходе ФПУ. Она составляет 0,44 мкс, что равно длительности времени нарастания импульсов на рис. 5. Другими словами, результаты численного и натурального экспериментов одинаковые.

Другим важным достоинством предложенного устройства является то, что для его настройки не требуются специальные измерительные приборы, ибо лазер излучает в видимом диапазоне, а результаты контролируются осциллографом.

Заключение

Диапазон рабочих частот акустооптического спектрально-временного анализатора составляет 40–60 процентов от центральной частоты АОМ, который может работать в диапазоне частот от нескольких десятков МГц до единиц ГГц. Современные технологии позволяют синтезировать ФУС (например, стеклообразную) с достаточно широкой временной апертурой (несколько десятков мкс). При этом требования к когерентности света не высокие и в качестве источника оптического излучения

можно использовать набор (линейку) полупроводниковых лазеров. Изложенные факты позволяют предположить, что, используя линейку фотодиодов, можно построить широкополосный акустооптической спектрально-временной анализатор в виде микросборки с необходимыми для решения конкретных задач параметрами.

ЛИТЕРАТУРА

1. Белов С. П., Жилияков Е. Г., Белов А. С., Золотарь Н. И. // Научный результат. Информационные технологии. 2018. Т. 3. № 3. С. 37.
2. Steyskal A. B., Kovtun S. O., Voytko V. V. // Visnyk NTUU KPI: Seriya-radiotekhnika radioaparotobuduvannia. 2021. № 86. P. 45. DOI: 10.20535/RADAP.2021.86.45-51
3. Рембовский А. М., Ашихмин А. В., Козьмин В. А. Радиомониторинг: задачи, методы, средства. – М.: Горячая линия-Телеком, 2015.
4. Kondakov D. V., Lavrov A. P. // Journal of Radio Electronics. 2019. № 1. Available at <http://jre.cplire.ru/jre/jan19/5/text.pdf>. DOI: 10.30898/1684-1719.2019.1.5
5. Li R., Chen H., Lei C. et al. // Opt. express. 2014. Vol. 22. № 11. P. 13579. DOI: 10.1364/OE.22.013579.
6. Chen L., Duan Y., Zhou H. et al. // Opt. express. 2017. Vol. 17. № 8. P. 9416. DOI: 10.1364/OE.25.009416.
7. Kotov V. M., Voronko A. I. // Instruments and experimental techniques. 2021. Vol. 64. № 4. P. 549. DOI: 10.1134/S0020441221040205
8. Проклов В. В., Ушаков В. Н. Акустооптические процессоры спектрального типа. – М.: Радиотехника, 2012.
9. Davis Christofer C. Lasers and Electro-optics. – Cambridge University Press, 2014.
10. Гасанов А. Р., Гасанов Р. А. // Специальная техника. 2013. № 1. С. 11.
11. Луске Е. Г., Сельменева Д. С., Шевцов Д. Е. // Вестник ПНИПУ: Электротехника, информационные технологии, системы управления. 2017. № 3. С. 121.
12. Barsukov P. O., Fainberg E. B., Khanbenskii E. O. // Izvestiya-physics of the solid earth. 2021. Vol. 57. № 3. P. 425. DOI: 10.1134/S1069351321030022
13. Гасанов А. Р., Гасанов Р. А., Рустамов А. Р., Ахмедов Р. А., Садыгов М. В. // Успехи прикладной физики. 2021. Т. 9. № 5. С. 430. DOI: 10.51368/2307-4469-2021-9-5-430-441
14. Zheleznykh I. M., Sadygov Z. Z., Khrenov B. A. // Proceedings of the 32-nd International Cosmic Ray Conference. (Beijing, January 2011). DOI: 10.7529/ICRC2011/V04/1101

PACS: 81.05. -t

Acousto-optic spectral-time analyzer

A. R. Hasanov, R. A. Hasanov, A. R. Rustamov, R. A. Ahmadov, I. I. Suleymanov,
and M. V. Sadikhov

Azerbaijan National Aviation Academy
30 Mardakan Ave., AZ1045, Baku, Azerbaijan Republic
E-mail: afig.gasanov.51@mail.ru

Received February 14, 2022

The article emphasizes the high scientific and practical importance of the problem of rapid detection and measurement of radio signal parameters in a wide frequency band. The features of Bragg diffraction are estimated in the context of the synthesis of a small-scale high-speed radio frequency meter. The scheme of a radio frequency meter based on Bragg diffraction is discussed. Scheme-mathematical modeling of the proposed device functioning algorithm is carried out. The possibility of realizing multichannel reception of radio pulses by selecting the angles of incidence of optical beams into the aperture of a photoelastic cell is proved, which makes it possible to use a wide band of operating frequencies of an acousto-optic modulator in full. The formulated statements are tested by numerical experiments. The results of circuit-mathematical modeling and calculations are being studied in natural. Some results of natural experiments are presented in the form of a table and oscillograms, which are discussed in the context of small-scale frequency analysis in a given range.

Keywords: radiopulse, Bragg diffraction, radio frequency meter, circuit-mathematical modeling, multichannel reception, acousto-optic modulator.

DOI: 10.51368/1996-0948-2022-2-62-71

REFERENCES

1. S. P. Belov, E. G. Zhilyakov, A. S. Belov, and N. I. Zolotar, *Nauchnyj rezul'tat. Informacionnye tekhnologii* **3** (3), 37 (2018).
2. A. B. Steyskal, S. O. Kovtun, and V. V. Voytko, *Visnyk NTUU KPI: Seriya-radiotekhnika radioaparotobuduvannya*, No. 86, 45 (2021). DOI: 10.20535/RADAP.2021.86.45-51
3. A. M. Rembovskij, A. V. Ashihmin, and V. A. Koz'min, *Radiomonitoring: zadachi, metody, sredstva* (Goryachaya liniya-Telekom, Moscow, 2015).
4. D. V. Kondakov and A. P. Lavrov, *Journal of Radio Electronics*, No. 1 (2019). Available at <http://jre.cplire.ru/jre/jan19/5/text.pdf>. DOI 10.30898/1684-1719.2019.1.5
5. R. Li, H. Chen, C. Lei et al., *Opt. express* **22** (11), 13579 (2014). DOI: 10.1364/OE.22.013579.
6. L. Chen, Y. Duan, H. Zhou et al., *Opt. express* **17** (8), 9416 (2017). DOI: 10.1364/OE.25.009416.
7. V. M. Kotov and A. I. Voronko, *Instruments and experimental techniques* **64** (4), 549 (2021). DOI: 10.1134/S0020441221040205
8. V. V. Proklov and V. N. Ushakov, *Akustoopticheskie processory spektral'nogo tipa* (Radiotekhnika, Moscow, 2012).
9. Christofer C. Davis, *Lasers and Electro-optics* (Cambridge University Press, 2014).
10. A. R. Gasanov and R. A. Gasanov, *Special'naya tekhnika*, No. 1, 11 (2013).
11. E. G. Liske, D. S. Sel'meneva, and D. E. Shevcov, *Vestnik PNIPU: Elektrotekhnika, informacionnye tekhnologii, sistemy upravleniya*, No. 3, 121 (2017).
12. P. O. Barsukov, E. B. Fainberg, and E. O. Khanbenskii, *Izvestiya-physics of the solid earth* **57** (3), 425 (2021). DOI: 10.1134/S1069351321030022
13. A. R. Gasanov, R. A. Gasanov, A. R. Rustamov, R. A. Ahmedov, and M. V. Sadyhov, *Usp. Prikl. Fiz.* **9** (5), 430 (2021). DOI: 10.51368/2307-4469-2021-9-5-430-441
14. I. M. Zheleznykh, Z. Z. Sadygov, and B. A. Khrenov, in *Proceedings of the 32-nd International Cosmic Ray Conference* (Beijing, January 2011). DOI: 10.7529/ICRC2011/V04/1101