

УДК 621.391.272

Спектрально-временной анализатор радиоимпульсов

Гасанов А.Р.^{1,*}, Гасанов Р.А.¹,
Рустамов А.Р.¹, Ахмедов Р.А.¹,
Сулейманов И.И.¹, Садыхов М.В.¹

* afig.gasanov.51@mail.ru

¹Национальная Академия Авиации Азербайджана,
Баку, Азербайджан

Обоснована высокая актуальность исследований в области обнаружения и измерения параметров радиосигналов. Особенности дифракции Брэгга проанализированы в контексте синтеза мелкомасштабного быстродействующего измерителя радиочастот. Составлена схема брэгговского спектрально-временного анализатора радиоимпульсов и обсуждена ее работа. Проведено соответствующее схемно-математическое моделирование. Показано, что, путем подбора углов падения оптических пучков в апертуру брэгговской ячейки, можно реализовать многоканальный прием радиоимпульсов. Проведена численная апробация полученных результатов. Результаты схемно-математического моделирования и расчетов апробированы экспериментально. Некоторые результаты экспериментальных исследований представлены в виде таблицы и осциллограмм, которые обсуждены в контексте измерения частоты радиоимпульсов в заданном диапазоне.

Ключевые слова: дифракция Брэгга, мелкомасштабный измеритель, спектрально-временной анализатор, схемно-математическое моделирование, радиоимпульс

1. Состояние вопроса и постановка задачи исследования

Роль радиолокации в современных военных операциях предопределяет высокую актуальность синтеза методов и средств для быстрого обнаружения и измерения частоты радиоволн. В контексте решения данной проблемы метод параллельного частотного анализа обладает высоким потенциалом. Однако аппаратная реализация параллельного метода достаточно сложна [1]. Используя спектрально-временной анализ заданного диапазона частот можно в некоторой мере сохранить достоинства параллельного частотного анализа и обеспечить достаточно высокое быстродействие. Некоторые методы и средства спектрально-временного анализа диапазона неопределенности обсуждаются в [2, 3]. В [2] проблему предлагают решить применением последовательно сканируемого гетеродинного

луча. В [3] для этой цели используют перекрестную фазовую модуляцию в высоко-нелинейном 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 обоих случаях присутствуют элементы последовательного частотного анализа. К тому же предложенные в этих работах средства измерения достаточно сложны в изготовлении и нуждаются в особой настройке. В контексте решения проблемы дифракция Брэгга обладает высоким потенциалом. Различные аспекты этой идеи обсуждены в [4].

Целью данной работы является аппаратная реализация брэгговского спектрально-временного анализатора, в котором сохраняются достоинства параллельного частотного анализа и обеспечивается высокое быстродействие.

2. Потенциальные особенности дифракции Брэгга

Дифракция Брэгга [5] реализуется в акустооптическом модуляторе (АОМ), в котором обрабатываемый электрический сигнал с несущей частотой f преобразуется электроакустическим преобразователем (ЭАП) в механическую 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 , определяемым по формуле

$$\theta_B = \arcsin(0,5\lambda/\Lambda), \quad (1)$$

где $\Lambda = v/f$ - длина упругой волны.

В результате дифракции Брэгга часть светового пучка отклоняется и через отверстие в диафрагме 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. $u_{out}(t) = cU_{in}(t - \tau)$, где x_0 - расстояние от ЭАП до точки акустооптического взаимодействия (рис. 1). При этом за счет низкой скорости распространения упругой волны в ФУС появляется возможность изменения времени задержки τ в достаточно широких пределах путем выбора соответствующего расстояния от ЭАП до точки акустооптического взаимодействия [6].

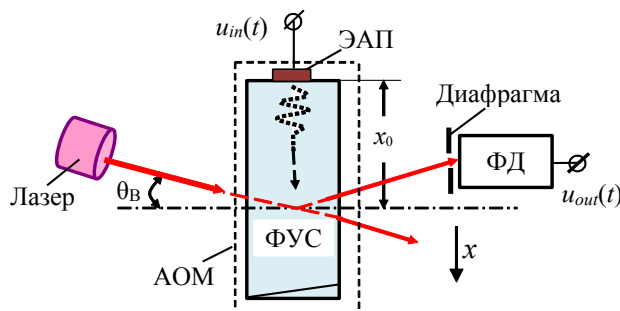


Рис. 1. Дифракция Брэгга

Важно отметить, что при изменении координаты точки акустооптического взаимодействия необходимо учитывать следующие ограничительные факторы: во-первых, должно сохраняться строго фиксированное положение ФД по отношению к падающему в апертуру АОМ лучу лазера; во-вторых, эффективное акустооптическое взаимодействие происходит лишь в определенном интервале углов между направлениями распространения упругой волны и луча лазера.

Вышеизложенные особенности дифракции Брэгга явились основой для синтеза спектрально-временного анализатора радиосигналов, в котором сохраняются (или почти сохраняются) достоинства параллельного частотного анализа и обеспечивается высокое быстродействие.

3. Схемно-математическое моделирование и расчет

Схема брэгговского спектрально-временного анализатора изображена на рис. 2. Система непрозрачного и полупрозрачных зеркал расщепляет излучение лазера на M пучков (в данном случае $M=3$), которые пересекают апертуру ФУС на различных расстояниях x_{0m} от ЭАП под различными углами Брэгга θ_{Bm} . В соответствии с новыми условиями формула (1) приобретает следующий вид:

$$\theta_{Bm} = \arcsin(0,5\lambda f_m/v), \quad (2)$$

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} лазерным лучом.

Из выражения (2) находим формулу для центральной частоты m -го канала приема в виде

$$f_m = 2\theta_{Bm}v/\lambda. \quad (3)$$

При выводе формулы (3) функция \arcsin опускается из-за малого аргумента.

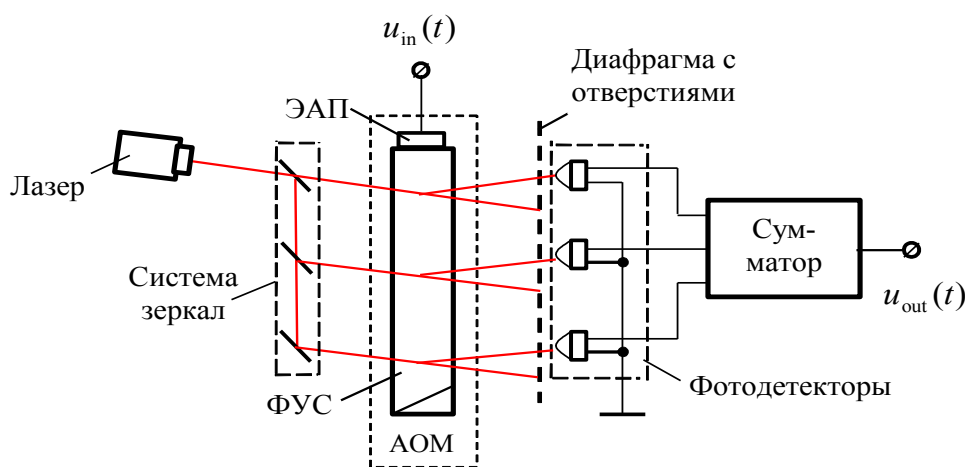


Рис. 2. Схема спектрально-временного анализатора

Формула (3) позволяет заключить, 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.

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 длительностью τ_i , т.е.

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

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

В этом случае на выходе сумматора формируется напряжение

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

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 .

В этих условиях m - й видеоимпульс на выходе сумматора $u_{out.m}(t)$ формируется только в том случае, если в полосе частот $f_m - \delta f \div f_m + \delta f$ находится некоторый радиоимпульс 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:

$$u_{out.m}(t) = if(f_m - \delta f < f'_m < f_m + \delta f, c \cdot U_{in.m}(t - \tau_m), 0).$$

Учитывая, что в данном случае нужен только признак о наличии радиоимпульса в полосе частот $f_m - \delta f \div f_m + \delta f$, последнее выражение можно переписать в следующей форме:

$$u_{out.m}(t) = if(f_m - \delta f < f'_m < f_m + \delta f, \sigma(t - \tau_m) - \sigma(t - \tau_i - \tau_m), 0).$$

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

Численный анализ

Моделируется алгоритм работы брэгговского спектрально-временного анализатора радиоимпульсов в полосе частот от 73 МГц до 87 МГц. Допустим, что используется 3-х канальный анализатор, т.е. $M = 3$. Также примем, что частотное разрешение спектрально-временного анализатора составляет $2\delta f = 4$ МГц. Соответственно просмотр осуществляется в полосах частот 73 - 77 МГц, 78 - 82 МГц и 83 - 87 МГц. При этом, условия Брэгга выполняются на центральных частотах указанных каналов: т.е. для первого луча - на частоте 75 МГц, для второго луча - на частоте 80 МГц, а для третьего луча - на частоте 85 МГц.

Для простоты будем считать, что выполняется равенство $f'_m = f_m$, т.е. на вход спектрально-временного анализатора одновременно поступают три радиоимпульса с частотами 75 МГц, 80 МГц и 85 МГц. Причем, длительности всех радиоимпульсов одинаковы и равны 1 мкс. Вычисленная и построенная в системе Mathcad временная диаграмма суммарного сигнала на входе спектрально-временного анализатора приведена на рис. 3.

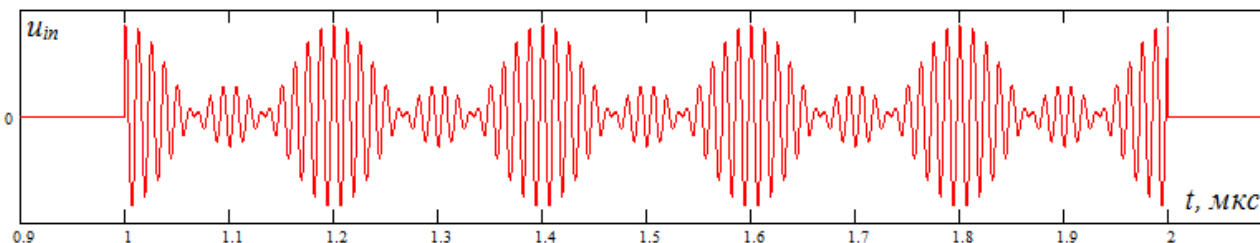


Рис. 3. Временная диаграмма суммарного сигнала на входе спектрально-временного анализатора

Очевидно, что временная диаграмма на рис. 3 не позволяет определить спектральный состав суммарного сигнала. Вместе с тем, электрический сигнал на выходе первого фотодетектора появляется только под действием радиоимпульса с частотой 75 МГц, на выходе второго фотодетектора – под действием радиоимпульса с частотой 80 МГц, а на выходе третьего фотодетектора – под действием радиоимпульса с частотой 85 МГц. Такая последовательность реакций фотодетекторов на суммарное воздействие радиоимпульсов обеспечивается различными условиями Брэгга для световых пучков в апертуре АОМ, ибо они падают на поверхность ФУС под различными углами.

Временная диаграмма сигнала на выходе сумматора приведена на рис. 4. Здесь первый видеоимпульс обусловлен действием радиоимпульса с частотой 75 МГц, второй видеоимпульс - действием радиоимпульса с частотой 80 МГц, а третий видеоимпульс - действием радиоимпульса с частотой 85 МГц.

Вышеизложенная последовательность событий на практике интерпретируются в обратном порядке, т.е. появление первого видеоимпульса указывает на наличие радиоимпульса в полосе частот 73-77 МГц, второго видеоимпульса – на наличие радиоимпульса в полосе частот 78-82 МГц, а третьего видеоимпульса – на наличие радиоимпульса в полосе частот 83-87 МГц.

Таким образом результаты численного моделирования алгоритма работы вышерассмотренного спектрально-временного анализатора 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 и 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.

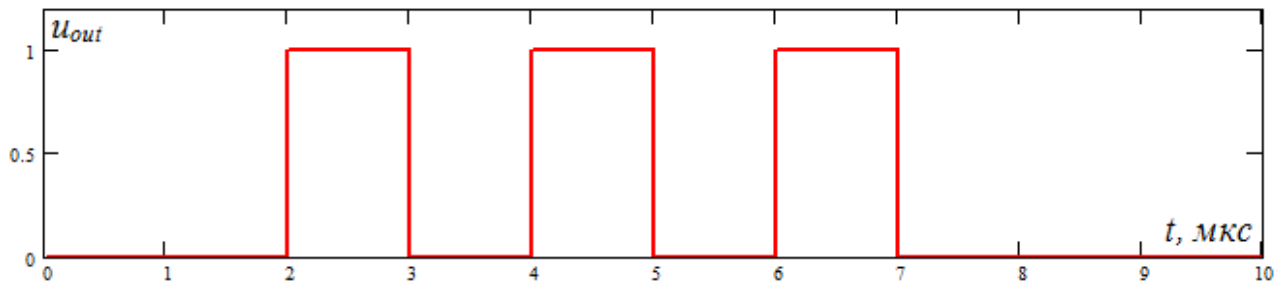


Рис. 4. Временная диаграмма сигнала на выходе сумматора

4. Экспериментальные исследования

Результаты схемно-математического моделирования и расчетов апробированы экспериментально. Макет спектрально-временного анализатора для экспериментальных исследований построен по схеме, приведенной на рис. 5. Там же показана применявшаяся измерительная аппаратура.

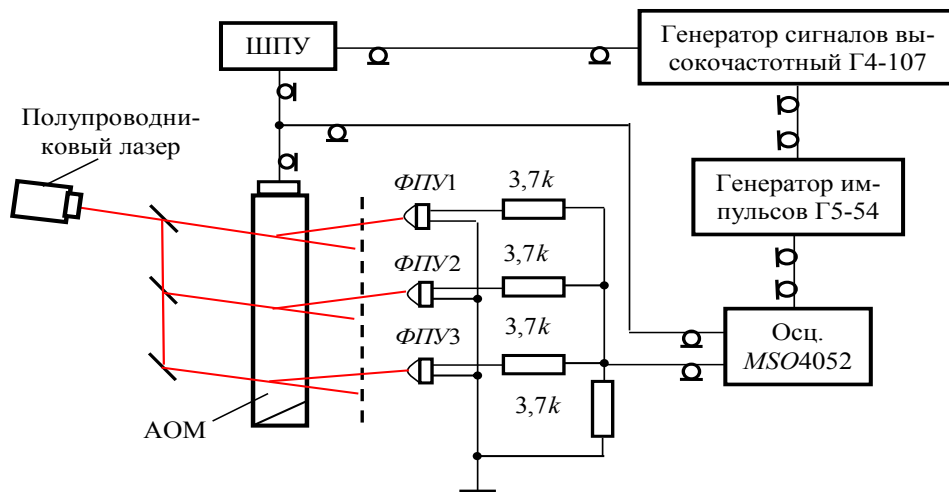


Рис. 5. Схема экспериментальной установки

Макет спектрально-временного анализатора реализован на АОМ с центральной частотой 80 МГц. В генераторе Г5-54 формируется видеоимпульс с длительностью 1 мкс. Этот видеоимпульс 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. Видеоимпульс от генератора Г5-54, также используется для синхронизации осциллографа MSO4052. Сумматор реализован на резисторах с сопротивлениями 3,7 кОм. В экспериментах был использован лабораторный вариант фотоприемного устройства (ФПУ), которое выполнено на матрице лавинных фотодиодов типа MAPD 3N [7].

В измерениях путем изменения частоты генератора Г4-107 были реализованы три значения времени задержки импульса от генератора Г5-54.

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 спектрально-временного анализатора 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 анализатора видеоимпульса с задержкой 1 мкс указывает на наличие на его входе радиоимпульса с частотой 75 МГц и т.д.

Осциллограммы радиоимпульса с частотой 80 МГц и длительностью 1 мкс на входе АОМ и видеоимпульса длительностью 1 мкс на выходе сумматора приведены на рис. 6. Здесь видеоимпульс длительностью в 1 мкс (определяется на уровне 0,5 от максимального значения) задержан относительно входного радиоимпульса примерно на 3 мкс.

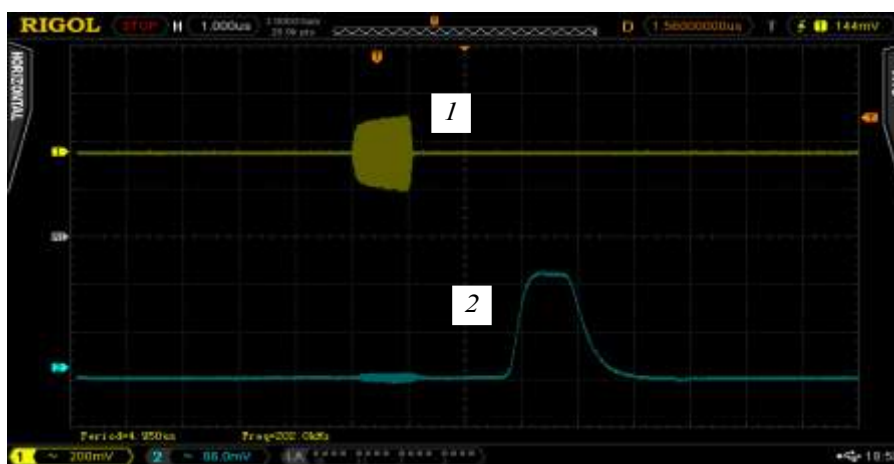


Рис. 6. Осциллограммы импульсов на входе АОМ (1) и на выходе сумматора (2)

5. Заключение

Полоса рабочих частот АОМ составляет 40-60 процентов от его центральной частоты. Современные технологии позволяют синтезировать ФУС (например, стеклообразную) с достаточно большой апертурой. При этом требования к параметрам источника света не высокие и в качестве источника оптического излучения можно использовать линейку полупроводниковых лазеров. Основываясь на изложенные факты легко предположить, что используя линейку фотодиодов можно построить широкополосный спектрально-временной анализатор в виде микросборки с необходимыми для решения конкретных задач параметрами.

Список литературы

1. Kondakov D. V., Lavrov A. P. Digital broadband multichannel receiver with subsampling operation analysis. Zhurnal Radioelektroniki - Journal of Radio Electronics. 2019. No. 1. Available at <http://jre.cplire.ru/jre/jan19/5/text.pdf>. DOI: [10.30898/1684-1719.2019.1.5](https://doi.org/10.30898/1684-1719.2019.1.5)
2. R. Li, H. Chen, C. Lei et al. Optical serial coherent analyzer of radiofrequency // Opt. express. 2014. Vol. 22, № 11. P. 13579-13585. DOI: [13579-13585. DOI: 10.1364/OE.22.013579.](https://doi.org/10.1364/OE.22.013579)
3. L. Chen, Y. Duan, H. Zhou et al. [Real-time broadband radiofrequency spectrum analyzer based on parametric spectro-temporal analyzer](#). Opt. express. 2017. Vol. 17, № 8. P. 9416-9425. DOI: [10.1364/OE.25.009416](https://doi.org/10.1364/OE.25.009416)
4. Акустооптические процессоры спектрального типа / под ред. В. В. Проклова, В. Н. Ушакова. М.: Радиотехника, 2012. 192 с
5. Kotov, V. M., Voronko, A. I. An Acoustooptic Spatial-Frequency Filter of Two-Color Radiation Operating in the First Diffraction Order // Instruments and experimental techniques. 2021. Vol. 64, № 4. P. 549-553. DOI: [10.1134/S0020441221040205](https://doi.org/10.1134/S0020441221040205)
6. Гасанов, А.Р. Гасанов, Р.А. Акустооптические линии задержки низкочастотных и высокочастотных электрических сигналов // Специальная техника, 2013, №1, с.11÷21.
7. Zheleznykh, I.M. Sadygov, Z.Z. Khrenov, B.A. Prospects of Application of Multi-pixel Avalanche Photo Diodes in Cosmic Ray Experiments // Proceedings of the 32-nd International Cosmic Ray Conference, Beijing, January 2011. DOI: [10.7529/ICRC2011/V04/1101](https://doi.org/10.7529/ICRC2011/V04/1101)

Spectral-time Analyzer of Radio Pulses

A.R. Hasanov^{1,*}, R.A. Hasanov¹,
A.R. Rustamov¹, R.A. Ahmadov¹,
I.I. Suleymanov¹, M.V. Sadikhov¹

* afig.gasanov.51@mail.ru

¹Azerbaijan National Aviation Academy,
Baku, Azerbaijan Republic

Keywords: Bragg diffraction, small-scale meter, spectral-time analyzer, circuit-mathematical modeling, radio pulse

Reducing the detection time and measuring the parameters of unknown radio signals in the uncertainty range is an important scientific and technical problem. In the context of solving this problem, spectral-time analysis is considered the most promising. Known publications for this purpose use a scanned heterodyne beam or cross phase modulation in a highly non-linear fiber to transfer the spectrum of the radio signal to the optical range, where real-time analysis is carried out using parametric time-spectrum analyzer technology. Obviously, in both cases, the measuring instruments used are rather complicated both in manufacturing and in adjustment.

In the context of solving this problem, Bragg diffraction has a high potential. In this case, the laser radiation is split into several light beams using opaque and semitransparent mirrors, which cross the aperture of the acousto-optic modulator (AOM) at different distances from the electro-acoustic transducer at different Bragg angles. The number of light beams is chosen equal to the number of subranges. This configuration makes it possible to implement Bragg diffraction modes at different frequencies. As a result, a frequency-dependent delay of video pulses is realized at the output of the analyzer. In other words, a radio pulse with a certain carrier frequency at the input corresponds to a video pulse with a certain time delay at the output of the analyzer. Thus, due to the use of the features of Bragg diffraction, a fast spectral-temporal analysis of radio pulses in a given frequency range is provided. At the same time, AOM is a broadband device with a large time aperture. The time aperture can reach several tens of microseconds. Consequently, it is possible to organize a large number of reception channels and conduct spectral-temporal analysis of radio pulses in a sufficiently wide frequency band.

References

8. Kondakov D. V., Lavrov A. P. Digital broadband multichannel receiver with subsampling operation analysis. Zhurnal Radioelektroniki - Journal of Radio Electronics. 2019. No. 1. Available at <http://jre.cplire.ru/jre/jan19/5/text.pdf>. DOI: [10.30898/1684-1719.2019.1.5](https://doi.org/10.30898/1684-1719.2019.1.5)
9. R. Li, H. Chen, C. Lei et al. Optical serial coherent analyzer of radiofrequency // Opt. express. 2014. Vol. 22, № 11. P. 13579-13585. DOI: [13579-13585. DOI: 10.1364/OE.22.013579.](https://doi.org/10.1364/OE.22.013579)
10. L. Chen, Y. Duan, H. Zhou et al. [Real-time broadband radiofrequency spectrum analyzer based on parametric spectro-temporal analyzer](#). Opt. express. 2017. Vol. 17, № 8. P. 9416-9425. DOI: [10.1364/OE.25.009416](https://doi.org/10.1364/OE.25.009416)
11. Акустооптические процессоры спектрального типа / под ред. В. В. Проклова, В. Н. Ушакова. М.: Радиотехника, 2012. 192 с
12. Kotov, V. M., Voronko, A. I. An Acoustooptic Spatial-Frequency Filter of Two-Color Radiation Operating in the First Diffraction Order // Instruments and experimental techniques. 2021. Vol. 64, № 4. P. 549-553. DOI: [10.1134/S0020441221040205](https://doi.org/10.1134/S0020441221040205)
13. Гасанов, А.Р. Гасанов, Р.А. Акустооптические линии задержки низкочастотных и высокочастотных электрических сигналов // Специальная техника, 2013, №1, с.11÷21.
14. Zheleznykh, I.M. Sadygov, Z.Z. Khrenov, B.A. Prospects of Application of Multi-pixel Avalanche Photo Diodes in Cosmic Ray Experiments // Proceedings of the 32-nd International Cosmic Ray Conference, Beijing, January 2011. DOI: [10.7529/ICRC2011/V04/1101](https://doi.org/10.7529/ICRC2011/V04/1101)