

Применение элементов радиофотоники для улучшения пространственного разрешения в системах радиочастотного мониторинга космического базирования

Г.А. Шарапов¹, А.И. Крюков¹, Э.Р. Жданов²

¹АО «ЦНИРТИ им. академика А.И. Берга»

²РТУ МИРЭА

Аннотация: для улучшения разрешающей способности в системах радиочастотного мониторинга космического базирования (КБ) предлагается применение работающего на сверхвысоких частотах акустооптоэлектронного спектроанализатора (АОС) нового типа на основе технологий радиофотоники. Указанные устройства применяют концентрацию энергии ультразвуковой волны в узком пучке, для чего выполняется согласование размеров описанного пучка за счет оптической системы и лазерного луча, поступающего на модулятор. Таким образом из-за неправильного выбора оптической системы происходит снижение отношения сигнал/шум АОС.

Ключевые слова: акустооптика, радиофотоника, акустооптоэлектронный спектроанализатор, акустооптический модулятор, радиочастотный мониторинг

Введение

В современных системах связи и радиолокации широко применяются сложные сигналы, в том числе, шумоподобные. Среди них достаточно распространены фазоманипулированные сигналы, в которых несущая частота промодулирована по фазе в соответствии с двоичной псевдослучайной последовательностью. Одной из задач, возникающих при анализе таких сигналов, является создание устройств, способных выявлять скачки фазы исследуемого сигнала в реальном масштабе времени [1]. К устройствам, позволяющим решить такой вид задач, можно отнести акустооптоэлектронные спектроанализаторы (АОС), являющимися неотъемлемой частью радиофотоники. Данный вид устройств хорошо показал себя при работе в составе систем радиочастотного мониторинга [2].

На рисунке 1 показана структурная схема АОС. Линзы Л3 и Л4 используются для фокусировки светового распределения на фотоприемнике, что приводит к увеличению отношения сигнала к шуму на фотоприемнике. Рост отношения сигнал/шум при увеличении выноса наблюдается до тех пор, пока световой пучок, освещающий акустооптический модулятор (АОМ), не становится шире ультразвукового.

Ниже приводится оценка отношения сигнал/шум на выходе спектроанализатора, построенного по данной схеме АОС. Для упрощения расчетов шум в области первого порядка считается преимущественно аддитивным от светового пучка нулевого порядка. Этот шум считается стационарным с нулевым средним значением.

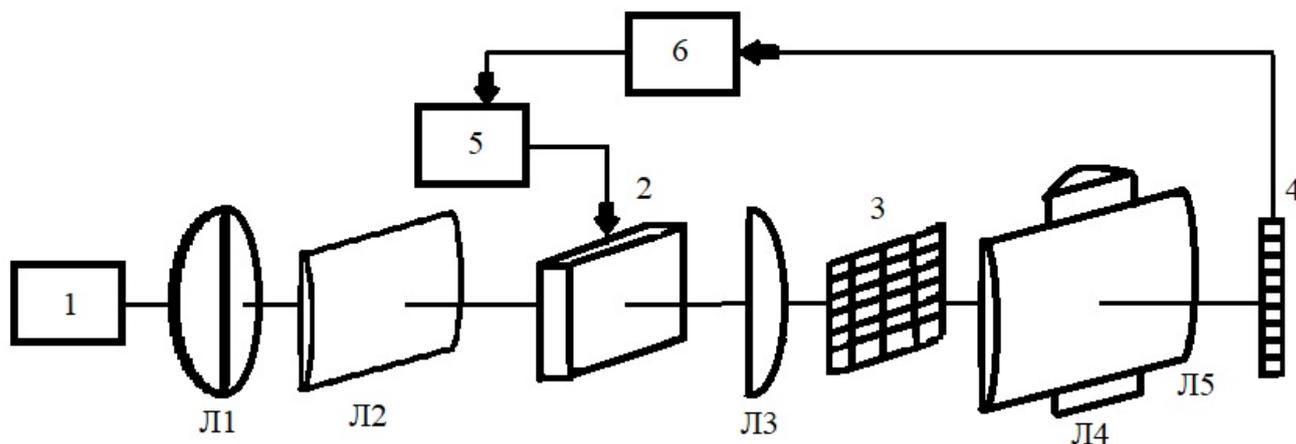


Рисунок 1. Структурная схема АОС для радиолокационных систем (РЛС) КБ 1 – Лазер; 2 – Акустооптический модулятор; 3 – Вейвлет-фильтр; 4 – Фотоприемная линейка; 5 – Источник сигнала; 6 – Персональный компьютер; Л1 – Формирователь оптического пучка; Л2 – Фокусирующая линза; Л3 – Сферическая линза; Л4, Л5 – Система линз, выполняющая преобразование Фурье вдоль горизонтальной оси и отображение вдоль вертикальной

При распространении лазерного пучка в пространстве на расстояние d от плоскости x, y до плоскости ξ, η для входной функции с разделяющимися переменными $U(x, y) = U_1(x)U_2(y)$, выходной сигнал из оптической среды может быть представлен в виде:

$$V(\xi, \eta) = V_1(\xi) V_2(\eta), \quad (1)$$

На рисунке 2 показано прохождение сигнала через оптическую систему, состоящую из сферической и цилиндрической линз, которые плотно прилегают друг к другу.

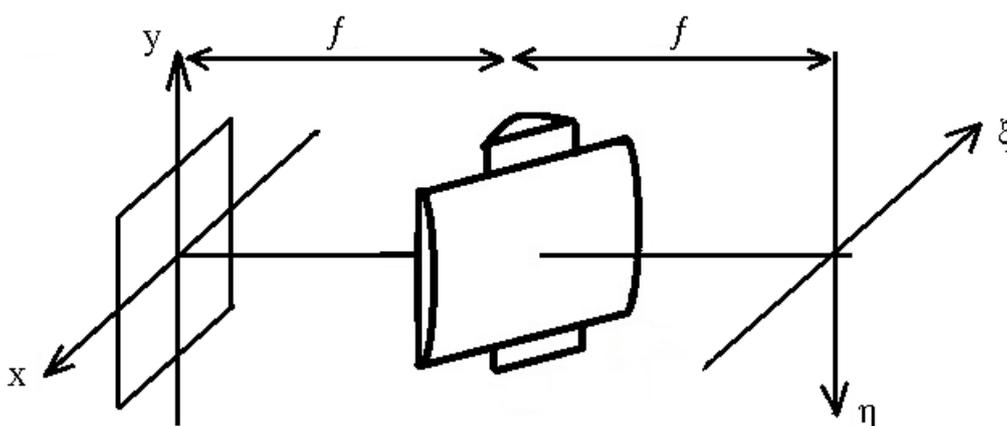


Рисунок 2. Оптическая схема с расположенными рядом сферической и цилиндрической линзами

В системах оптической обработки основные соотношения при распространении когерентного светового пучка света были изначально получены для сферической оптики. Однако эти результаты также могут быть применены в оптических схемах с цилиндрическими линзами, при условии, что оптический сигнал на входе системы

является функцией с разделяющимися переменными [3]. На основе предложенного подхода проводится расчет отношения сигнал/шум в АОС [4, 5].

Теоретическое исследование влияния радиофотонных технологий на отношение сигнал/шум акустооптических спектроанализаторов.

Важным аспектом при разработке АОС является выбор режима работы (режим дифракции Брэгга или Рэйли) акустооптического модулятора (АОМ), что является основополагающим при оценке разработанных и готовых устройств. В режиме дифракции Брэгга, когда акустическая волна и световой луч распространяются под определенным углом друг к другу, может быть достигнута высокая эффективность модуляции с лучшим отношением сигнал/шум за счет точной настройки параметров волны и условий дифракции. В целом улучшение отношения сигнал/шум

Отношение сигнал/шум определяет способность радиоэлектронных систем различать полезный сигнал на фоне шумов, которые могут возникать из-за внешних и внутренних факторов. В отношении АОС под «шумом» подразумевается нежелательные изменения интенсивности световых потоков по причинам, связанных с переотражением, поглощением рассеиванием, флуктуации мощности акустического сигнала, электронного шума в системе управления и другими источниками [6].

Увеличение значения отношения сигнал/шум в АОС играет важную при создании и модернизации большого числа аппаратуры радиочастотного мониторинга и влияет на такие задачи, как модуляция света в оптических коммуникациях, лазерное сканирование и обработка оптических сигналов. Для улучшения отношения сигнал/шум используются различные методы: оптимизация параметров акустической волны, улучшение качества используемых оптических материалов, минимизация световых потерь и использование электронных компонентов высокого качества (одобренных ОТК) для генерации и контроля акустических сигналов.

Отсюда получаем интенсивность сигнала в максимуме дифракционного порядка:

$$I_{c \max} = \frac{\vartheta}{\lambda f} |E_0|^2 X^2, \quad (1)$$

где $|E_0|$ – максимально значение амплитуды светового пучка, освещающего модулятор; X – ширина окна функции пропускания апертуры по оси x .

Получаемые результаты отношения сигнал/шум в АОС удобно нормировать по распределению энергетического спектра в его максимуме.

Для вычисления шума в точке максимального сигнала (при значении $\xi = \xi_0, \eta = 0$) получаем следующее выражение:

$$I_{\phi}(\xi, \eta) = \sigma^2(\xi, \eta) = |E_0|^2 \frac{X}{\lambda f} W_{\text{нх}} \left(\frac{2\pi\xi}{\lambda f} \right) U_{2 \text{ норм}}^2(\eta), \quad (2)$$

где $\sigma^2(\xi, \eta)$ – дисперсия выходного шума; $W_{\text{нх}} \left(\frac{2\pi\xi}{\lambda f} \right) = \int_{-\infty}^{\infty} K(\Delta x, 0) e^{-i\frac{2\pi}{\lambda f}\xi\Delta x} d(\Delta x)$ – одномерное распределение энергетического спектра входного шума по оси ξ ; $K(\Delta x, \Delta y)$ – корреляционная функция входного шума [4].

Из выражений (1) и (2) получаем отношение сигнал/шум на выходе для схемы АОС:

$$\frac{I_{c \max}}{I_{\phi}} = \frac{\vartheta X}{\sigma_n^2 \Delta_k W_{\text{нх норм}} \left(\frac{2\pi\xi_0}{\lambda f} \right)}.$$

Отношение сигнал/шум на выходе для схемы АОС получилось равным $\frac{I_{c \max}}{I_{\phi}} \leq 10$.

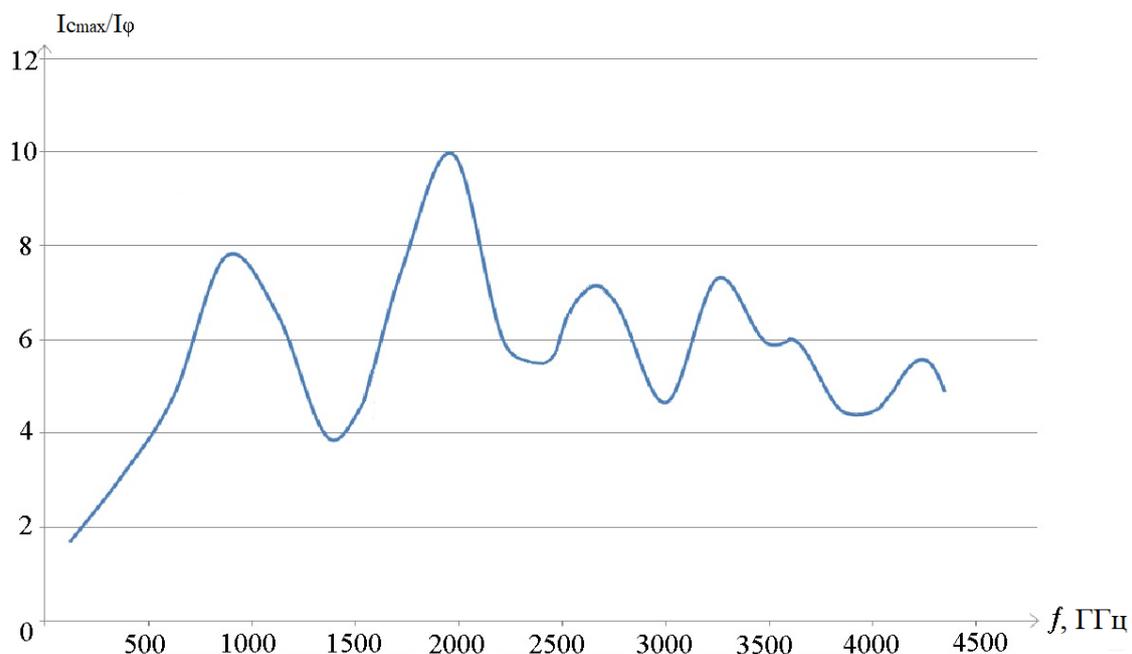


Рисунок 3. График отношения сигнал/шум на выходе акустооптоэлектронного спектроанализатора

Заключение

Рассмотрена структурная схема акустооптоэлектронного спектроанализатора на алмазной кристаллической структуре и рассчитано отношение сигнал/шум на выходе для схемы анализатора спектра.

На основании выполненных расчетов и построенного графика отношения сигнал/шум можно сделать вывод о перспективности применения оптического акустооптоэлектронного спектроанализатора в составе бортовой аппаратуры высокоскоростной радиолинии в системах радиочастотного мониторинга космического базирования для анализа сложных сигналов с использованием частотно-временного спектра. В реальных антенных системах положение излучателей в пространстве и токи в них отличаются от расчетных из-за наличия производственных допусков и влияния внешних условий. Если принять, что положение элементов решетки, амплитуда и фаза токов в них является случайными величинами, то форма диафрагмы направленности, уровень боковых лепестков и другие параметры решетки становятся такими же случайными величинами, распределение которых характеризуется величиной указанных отклонений [7]. Благодаря внедрению АОС возможна минимизация влияния перечисленных дестабилизирующих факторов. Необходимо провести сравнительный анализ полученных данных и характеристик действующих радиолокационных комплексов для более детального понимания преимуществ акустооптоэлектронного спектроанализатора на основе алмазной кристаллической структуры.

Работа выполнена за счет **средств государственного задания № F5FZ-2024-0006.**

Список литературы

1. Медведский Ю.Н., Шарапов Г.А. Методы обработки сложных сигналов РЛС СВЧ-диапазона на основе оптического вейвлет-процессора // М.: II Всероссийская Микроволновая конференция. – 2014. – С. 326;
2. Бочаров А.Г., Кашуркин К.С., Шарапов Г.А. Разработка акустооптоэлектронного приемника СВЧ-диапазона для систем РЧМ // М.: Вестник РАЕН. – 2019. Т. 19, № 3. – С. 47;
3. Гудмен Дж. Введение в Фурье-оптику [Текст] / Дж. Гудмен. // М.: Мир. – 1970. – С. 364;

4. Рогов С.А., Сергеев Д.С., Скороход В.В. Увеличение отношения сигнал/шум в акустооптическом анализаторе спектра с использованием астигматической оптики // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Информатика. Телекоммуникации. Управление. – 2012. № 3 (150). – С. 7-12;
5. Янг Э. Расчет акустооптических устройств [Текст] / Э. Янг, ЯО Шикай // ТИИЭР. – 1981. Т. 69, № 1. – С. 62-74.;
6. Бронштейн, И.Н. Справочник по математике [Текст] / И.Н. Бронштейн, К.А. Семендяев. // М.: – 1967. С. 608;
7. Тарасов Л.В. Когерентнооптическая обработка радиосигналов [Текст] / Л.В. Тарасов, В.А. Ежов // Зарубежная электроника. – 1980. № 2. – С. 3-36;
8. Жданов Э.Р., Славянский А.О., Харина О.С., Шпак А.В. Проектирование антенной решётки из состава бортовой аппаратуры высокоскоростной радиолинии // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2023. Т. 22, № 4. С. 59-70. DOI: 10/18287/2541-7533-2023-22-4-59-70