

ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

DOI 10.24412/1829-0450-fm-2025-2-45-53
УДК 621.677

Поступила: 10.09.2025г.
Сдана на рецензию: 10.09.2025г.
Подписана к печати: 16.09.2025г.

ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ОПТИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ ОТ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ АНТЕННОЙ РЕШЕТКИ В СВЧ-ДИАПАЗОНЕ

Г.Г. Степанян¹, А.В. Амбарцумян^{1,2}

¹*Российско-Армянский (Славянский) университет*

²*ООО «ЕИА Инжиниринг»*

hrach8086@gmail.com, Harut.hambarcumyan.98@gmail.com

АННОТАЦИЯ

В статье рассмотрены исследования и проектирование системы оптической обработки сигналов, поступающих от распределенной антенной решетки в СВЧ-диапазоне. Традиционные системы обработки сигналов, такие как радиолокационные и радиопеленгационные станции, обладают высокой эффективностью, но при обнаружении становятся уязвимыми для атак и радиочастотного подавления. Предлагаемая концепция базируется на использовании электрооптических модуляторов (ЭОМ), которые преобразуют радиочастотный сигнал в оптический для последующей передачи через волоконно-оптические линии связи. Это позволяет существенно снизить уязвимость системы, размещая основную аппаратуру обработки

сигналов на значительном удалении от антенн, обеспечивая ее защиту. В случае атаки утрата ограничивается лишь антенной, что повышает общую живучесть системы в условиях активного противодействия. Дополнительным преимуществом является переход на оптические технологии, обеспечивающие низкие потери сигнала по сравнению с радиочастотными кабелями, где потери достигают десятков дБ на ту же длину.

Ключевые слова: оптическая обработка сигналов, электрооптический модулятор, волоконно-оптические линии связи, СВЧ-диапазон, распределенная антенная решетка.

Введение

Современные системы обработки сигналов, такие как радиолокационные станции и радиопеленгационные системы, широко применяются в различных отраслях, включая оборону, телекоммуникации и управление воздушным движением [1]. Эти системы обеспечивают высокую точность и надежность при решении задач обнаружения, отслеживания и передачи данных. Однако их уязвимость при обнаружении представляет серьезную проблему, особенно в условиях потенциальных атак. Обнаружение излучателя (антенны) делает такие системы уязвимыми для атак, направленных на их подавление или выведение из строя [2]. Одним из перспективных подходов к решению этой проблемы является использование оптических технологий в особенности оптоволокно для передачи и обработки сигналов [3]. В отличие от традиционных радиочастотных систем, волоконно-оптические линии связи обладают рядом преимуществ: низкими потерями сигнала, устойчивостью к электромагнитным помехам и возможностью передачи данных на большие расстояния с высокой скоростью [4].

Целью данной работы является исследование и проектирование системы оптической обработки сигналов, поступающих от распределенной антенной решетки в СВЧ-диапазоне. Предлагаемая система использует электрооптические модуляторы (ЭОМ) для преобразования радиочастотных сигналов в оптические и их последующей передачи

через волоконно-оптические линии связи [5]. Такая архитектура обеспечивает не только защиту основной системы обработки, но и улучшение качества передачи сигнала за счет уменьшения потерь и помех.

Существующие системы оптической обработки сигналов

В радиолокационных системах оптические технологии используются для повышения качества обработки сигналов [2]. Например, системы “Radio-over-Fiber (RoF)” позволяют передавать радиочастотные сигналы через оптоволокно с минимальными потерями [6]. Это особенно актуально для работы с распределенными антенными решетками, где необходимо передавать сигнал от удаленных антенн к центральному процессору обработки. Существуют примеры использования оптических технологий в оборонных приложениях. Например, системы управления беспилотными летательными аппаратами (БПЛА) используют оптоволокно для передачи команд и данных с высокой надежностью и устойчивостью к помехам. Также в современных радарных системах волоконно-оптические линии связи применяются для передачи сигналов с малым затуханием [4].



Рисунок 1. Организация системы связи и передачи информации между несколькими точками.

Наилучшим примером является уже существующая система связи и передачи информации между несколькими точками, которая использует волоконно-оптическую линию связи для построения сети (Рис. 1).

В ней используются радиочастотные приемопередатчики, а распространение и построение сети осуществляется через оптику. Преимуществом в этой системе играет электрооптический модулятор, основная функция которого заключается в преобразовании радиочастотного (РЧ) сигнала в оптический, что открывает возможность его дальнейшей передачи через волоконно-оптические линии связи.

Электрооптический модулятор (ЭОМ) является одним из важнейших компонентов системы оптической обработки сигналов. ЭОМ работает на основе электрооптического эффекта (эффекта Погкельса), который заключается в изменении показателя преломления материала под воздействием электрического поля. Это изменение приводит к фазовой, амплитудной, поляризационной модуляции светового сигнала.

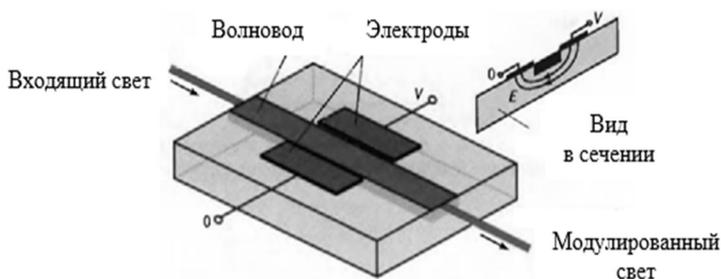


Рисунок 2. Вид электрооптического модулятора.

Конструкция ЭОМ зависит от типа модуляции, но в большинстве случаев включает несколько ключевых элементов: оптический волновод или кристалл, через который проходит свет, электроды, создающие управляющее поле, и модулирующую среду, в которой происходит изменение оптических свойств [7]. Основные компоненты ЭОМ включают источник света (лазерный диод или другой когерентный источник света, создающий стабильный оптический сигнал), электро-

оптический кристалл (Материал с высоким коэффициентом электрооптического эффекта, например, ниобат лития LiNbO_3 или арсенид галлия GaAs) и электроды (для приложения электрического поля, соответствующего радиочастотному сигналу).

Принцип работы модулятора состоит в следующем: свет, проходящий по волноводу, разделяется на два пучка Y -разветвителем. Каждый из разделенных пучков проходит между электродами на поверхности кристалла. Электрический сигнал вызывает изменение показателя преломления светового канала. Напряжения приложены так, чтобы ускорить движение излучения в одном плече и замедлить в другом, что позволяет в два раза снизить требуемые управляющие напряжения. Затем волны складываются Y -соединителем. Элемент изготавливается из материалов с сильным электрооптическим эффектом – таких, как LiNbO_3 , GaAs , InP [7].

Предлагаемая система на основе электрооптической обработки

Основной задачей является преобразование радиочастотного сигнала в оптический для эффективной передачи по волоконно-оптическим линиям связи и последующей цифровой обработки. На основе уже существующих примеров предлагается система оптической обработки сигналов на основе электрооптических модуляторов. Система направлена на повышение скрытности и безопасности станций за счет разнесения антенны и блока обработки сигналов. Сам модулятор будет находиться под антенной, после входной цепи и малошумящего усилителя (МШУ) (Рис. 3).

После приема сигналов от антенны в СВЧ-диапазоне, сигнал проходит через радиочастотный тракт, где фильтруется и усиливается через маломощный усилитель. Для следующего шага нам нужен оптический источник излучения. Для достижения высокой точности и стабильности работы системы необходим лазер с распределенной обрат-

ной связью (DFB). Он гарантирует неизменность длины волны и узкую ширину спектра. При очень больших расстояниях затухание сигналов неизбежно, даже в оптических волокнах, поэтому при больших дальностях целесообразно использовать эрбиевые волоконные усилители (EDFA) в репиттерных пунктах оптической линии. Ниже на рис. 5 представлена схема системы для одной антенны.

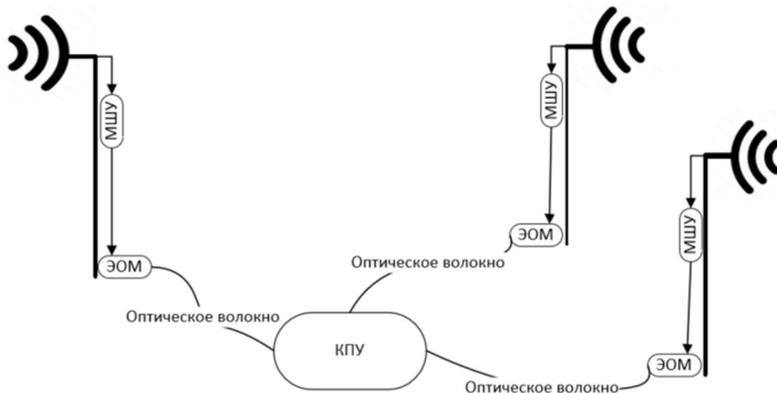


Рисунок 3. Предлагаемая система с распределенной антенной решеткой.
Обозначения: КПУ – контрольный пункт управления; МШУ – малошумящий усилитель; ЭОМ – электрооптический модулятор.

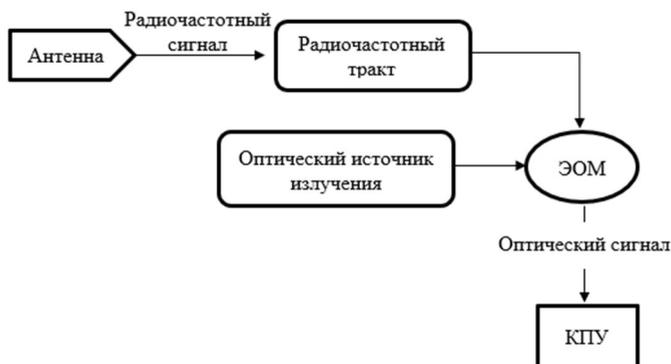


Рисунок 4. Предлагаемая блок-схема системы для одной антенны.

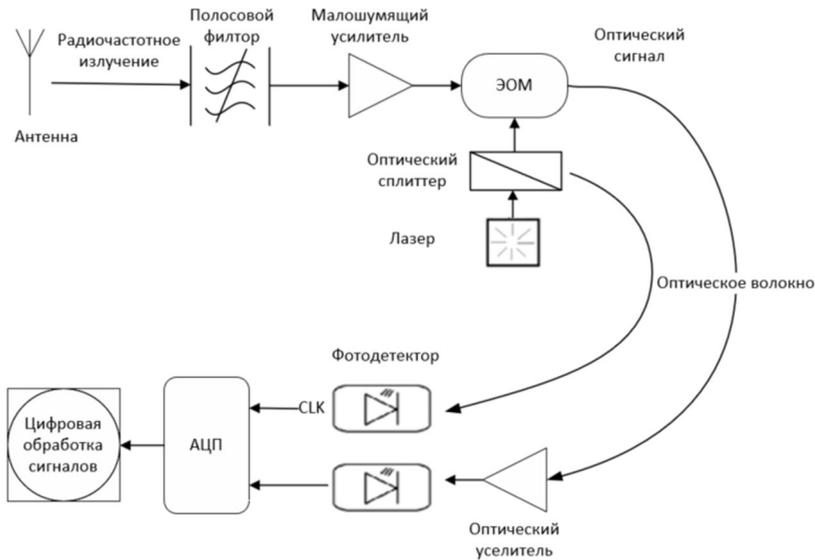


Рисунок 5. Предлагаемая схема системы для одной антенны
 Обозначения: АЦП – аналого-цифровой преобразователь;
 CLK – тактовый сигнал (clock).

Блок-схема демонстрирует применение оптических технологий использования современных оптических технологий для повышения эффективности работы с радиочастотными сигналами. Начальным элементом системы является антенна, которая принимает радиочастотное излучение от удаленных радиоисточников. Усиленный сигнал поступает на электрооптический модулятор, который играет центральную роль в этой системе. Электрооптический модулятор преобразует радиочастотный сигнал в оптический, используя лазер. По сути, он накладывает характеристики радиочастотного сигнала на световой луч, создавая модулированный оптический сигнал, который готов для передачи по волоконно-оптической линии связи. Лазер, используемый в системе, служит источником когерентного света, который необходим для работы электрооптического модулятора. Часто используется длина волны 1550 нм [7]. На стороне приема оптический сигнал усиливается с помощью оптического усилителя, например, эрбиевого

усилителя. После усиления сигнал поступает на фотодетектор, который выполняет его обратное преобразование в электрическую форму, восстанавливая его радиочастотные характеристики. Преобразованный электрический сигнал передается на аналого-цифровой преобразователь (АЦП), который оцифровывает его для дальнейшей обработки [8]. На этом этапе система обеспечивает точное преобразование аналогового сигнала в цифровую форму, что делает возможным использование современных методов цифровой обработки сигналов.

Выводы

Представленная блок-схема эффективно сочетает оптические и радиочастотные технологии, позволяя передавать и обрабатывать радиочастотные сигналы с минимальными потерями и высокой устойчивостью к помехам. Использование электрооптического модулятора, волоконно-оптических линий связи и оптических усилителей обеспечивает передачу сигналов на большие расстояния, сохраняя их качество. Основное преимущество системы, это разнесение антенны и блока обработки на значительные расстояния, что повышает защищенность и живучесть системы в случае внешних воздействий. Благодаря высокой пропускной способности и малым потерям система особенно актуальна для работы в СВЧ-диапазоне и при передаче широкополосных сигналов. Этот подход открывает перспективы для использования в радиолокации, телекоммуникациях и других областях, требующих надежной и высокоэффективной передачи данных.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Smolinski Smolinski C., Daley C.* Optical Signal Processing Techniques. 1982. Fort Belvoir: Defense Technical Information Center, 120p.
2. *Бояринов И.В., Кузнецов А.С.* Оптические технологии в системах связи. 2018. М.: Радио и связь, 200 с.
3. *Крутов В.А., Лебедев Д.И.* Электрооптические модуляторы в системах связи. 2021. М.: Журнал «Радиотехника», № 4. СС. 45–52.
4. *Седов В.Н.* Современные волоконно-оптические линии связи. 2022. СПб: ЛЭТИ, 150с.

5. *Porzi C., Selleri S., Scotti F., et al.* High-Speed Electro-Optic Modulation Techniques for Fiber Communication Systems. 2020. New York: IEEE, Proc. IEEE Photonics Conference. PP. 1–4.
6. *Yariv A.* Photonics: Optical Electronics in Modern Communications. 2006. New York: Oxford University Press, 850p.
7. *Желтиков В.А., Пасечникова Д.В., Хыдырова С.* Обзор электрооптических модуляторов в квантовых оптических интегральных схемах” МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2022
8. *Kazovsky L., Li W., Shaw S.* Optical Fiber Communication Systems. 2012. Berlin: Springer, 320p.

RESEARCH AND DEVELOPMENT OF THE SYSTEM OPTICAL SIGNAL PROCESSING FROM A DISTRIBUTED ANTENNA ARRAY IN THE MICROWAVE RANGE

H. Stepanyan¹, H. Hambardzumyan^{1,2}

¹*Russian-Armenian (Slavonic) University*

²*InstitLtd. YEA Engineering*

ABSTRACT

This paper examines the research and design of an optical signal processing system for a distributed antenna array operating in the microwave range. Traditional signal processing systems, such as radar and direction-finding stations, are highly effective but become vulnerable to attacks and suppression once detected. The proposed concept is based on the use of electro-optical modulators (EOM), which convert radio frequency signals into optical signals for subsequent transmission via fiber-optic communication lines. This approach significantly reduces system vulnerability by enabling the placement of the main signal processing equipment at a considerable distance from the antennas, ensuring its safety. In the event of an attack, the loss is limited to the antenna, thus improving the overall survivability of the system under hostile conditions. Another advantage is the transition to optical technologies, which ensure lower signal losses compared to radio frequency cables, where losses can reach tens of dB over the same length.

Keywords: Optical signal processing, electro-optical modulator, fiber-optic communication lines, microwave range, distributed antenna array.