

УДК 303.732.4

ВЫБОР СПОСОБОВ МОДУЛЯЦИИ В ОПТИЧЕСКОМ МЕЖСПУТНИКОВОМ ТРАКТЕ

С.Б. Пичугин, И.Е. Кальницкий

Канд. техн. наук С.Б. Пичугин; И.Е. Кальницкий
(ПАО РКК «Энергия» им. С.П. Королёва)

Целью исследования является обоснование выбора способов оптической модуляции для наиболее эффективного обеспечения оптической связи космических кораблей и орбитальных комплексов. Определено, что для этого требуется выполнение двух подзадач, связанных с поиском и сопровождением космического аппарата, а также передачей данных по установленному соединению. Объектом исследования является бортовой ретрансляционный оптический комплекс космического корабля или орбитального комплекса. По результатам исследования предложены типы модуляторов, наиболее приемлемые для выполнения указанных задач.

Ключевые слова: бортовой ретрансляционный оптический комплекс, способ модуляции, поиск и сопровождение космического аппарата, передача данных, межспутниковый тракт

Choice of the Ways of Modulation in the Optical Inter-Satellite Path. S.B. Pichugin, I.E. Kalnitsky

The study is aimed to substantiate the choice of optical modulation ways for ensuring the most efficient optical communication for space vehicles and orbital complexes. It has been determined that it requires to perform two subtasks related to the search and tracking of a space vehicle as well as to the data transfer via an established connection. The object of the study is an on-board relay optical system of a space vehicle or an orbital complex. Results of the study allow proposing the types of modulators most suitable for performing these tasks.

Keywords: on-board optical relay system, modulation ways, search and tracking of a space vehicle, data transmission, inter-satellite path

На текущем этапе развития отечественной космонавтики остро стоит задача обеспечить космонавтов на пилотируемых космических аппаратах (КА) и орбитальных комплексах (ОК) надежной широкополосной связью, которая позволит им повысить оперативность обмена данными в реальном масштабе времени.

Связь при этом может осуществляться с борта КА (ОК) через межспутниковые тракты (МСТ) на КА (ОК), а также на КА орбитальных группировок с иными целевыми предназначениями. Для обеспечения высокой скорости передачи информации предлагается использовать оптический диапазон для связи между КА, поскольку это позволяет обеспечить скорость обмена информацией на два порядка выше, чем в радиоканале [1], однако, чтобы

реализовать такую связь, требуется учесть ряд факторов, связанных с особенностями эксплуатации КА (ОК) и другими условиями, вплоть до текущей ситуации в космической отрасли.

Актуальность исследования обусловлена тем, что на текущем этапе существенно возрастает роль времени доставки информации потребителю, а межспутниковая связь позволяет доставить информацию за интервал времени, не превышающий рекомендацию Международного союза электросвязи [2].

Цель и задачи исследования

Цель исследования состоит в том, чтобы научно обосновать выбор технологий по установлению и поддержанию с последующим обменом данными оптического межспутникового соединения в многоспутниковой низкоорбитальной системе связи (в рамках исследований методов беспроводной передачи данных с борта КА (ОК) на КА (ОК) и обратно). В соответствии с поставленной целью исследования формулируется многопараметрическая задача по поиску лазерным лучом объекта в космическом пространстве с последующим установлением и поддержанием канала связи с найденным объектом, а также обеспечение широкополосной передачи данных по установленному соединению. В числе ограничений исследования перечисляются факторы, влияющие на техническую сторону реализации МСТ.

В настоящее время существует путаница в терминологии, так как в оптике модулятором называется любое устройство, изменяющее параметры оптического луча и закладывающее информацию в свет. Сканирующие системы осуществляют сканирование благодаря информации, заложенной в свет путем частотной или фазовой модуляции, поэтому они называются модуляторами так же, как и устройства по вводу информации в электромагнитную волну. Здесь и далее для обозначения сканирующих систем будет использоваться термин – «модуляторы для пространственного сканирования», а для обозначения устройства для ввода информации в электромагнитную волну – «модуляторы для передачи данных».

Как следует из цели и задач исследования, выбор соответствующего способа модуляции в оптическом тракте является многопараметрической задачей, которая требует разделить единую задачу обеспечения связи на две подзадачи: *первая* – осуществить поиск и последующее сопровождение заданного объекта лазерным лучом; *вторая* – передать данные по установленному соединению.

Данная работа посвящена исследованию в рамках указанных двух подзадач. *Объектом* исследования является бортовой ретрансляционный оптический комплекс (БРОК) КА или ОК. БРОК является элементом космического аппарата связи, отвечающим за прием, маршрутизацию и передачу информации. *Предметом* исследования являются поиск и сопровождение

соседнего КА или ОК с передачей данных в МСТ через БРОК КА или ОК. Осуществление передачи данных через БРОК и МСТ осложняется различными факторами космического полета, в том числе температурным режимом, массой, габаритами устройства.

Выбор *методического аппарата* исследования обусловлен неопределенностью, связанной с формированием перечня факторов, оказывающих влияние на техническую реализацию решения в рамках каждой задачи. В этой связи применялся *экспертный метод*, который позволяет с приемлемой для исследования точностью и надежностью получить перечень факторов и степень их влияния на соответствующее техническое решение. Экспертная группа включала в себя ведущих специалистов по проблематике из предприятий космической отрасли. После того как факторы и степень их влияния для каждой из двух подзадач, упомянутых выше, были определены, для выбора наиболее приемлемого способа модуляции из перечня известных используется математический аппарат *взвешенного ранжирования*, который позволяет по совокупности технических характеристик осуществить на основе многокритериального анализа обоснованный выбор типа модулятора для пространственного сканирования и аналогично для передачи данных, предназначенных для применения в БРОК КА или ОК.

Модуляторы для пространственного сканирования

На сегодняшний день, помимо электромеханического модулятора, не обеспечивающего достаточную точность и устойчивость сопровождения объекта, известны следующие три типа модуляторов, реализующих метод электронного сканирования пространства лазерным лучом:

- микрозеркальные модуляторы (Digital Micromirror Device, DMD);
- жидкокристаллические модуляторы (Liquid Crystal on Silicon, LCoS);
- рельефографические (рельефно-фазовые) модуляторы (Light Modulator Relief, LMR).

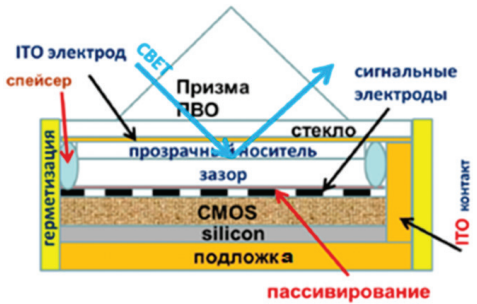
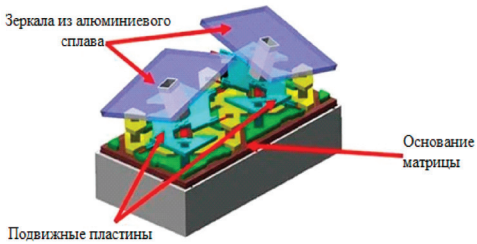
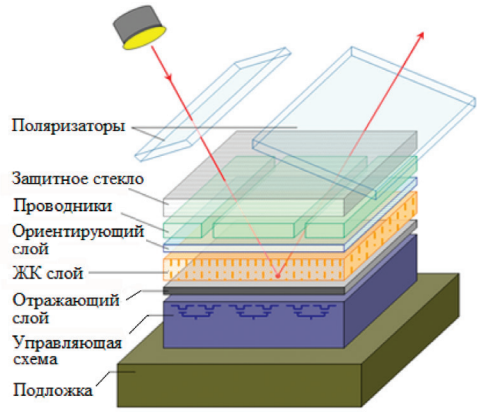
Принцип работы и обобщенные схемы модуляторов, приведенных выше, представлены в табл. 1 [1, 3–7].

По результатам экспертного опроса для модуляторов, реализующих электронное сканирование пространства лазерным лучом, составлен перечень характеристик, оказывающих, по мнению экспертов, наибольшее влияние на эффективность их применения на борту КА и ОК:

- допустимый сектор сканирования (ДСС);
- скорость сканирования (СС);
- габариты (Г);
- масса (М);
- температурный диапазон (ТД);
- возможность локализации применительно к условиям России (ВЛР).

Таблица 1

Принцип работы и обобщенные схемы модуляторов
электронного сканирования пространства

Тип модулятора	Принцип действия	Иллюстрация
LMR	Преобразование электрического сигнала в трехмерный геометрический рельеф на прозрачном диэлектрическом гелеобразном слое	
DMD	Преобразование электрического сигнала в положения зеркал, из которых состоит модулятор. Положения могут быть «0» (отражает свет) или «1» (не отражает свет)	
LCoS	Преобразование электрического сигнала в показатель преломления жидкокристаллического слоя, из состава модулятора. Синонимами LCoS являются аббревиатуры D-ILA (Direct Drive Image Light Advanced) и SXRD (Silicon X-tal Reflective Display)	

Ввиду того, что в космическом пространстве температура меняется в широких пределах, для каждого модулятора необходима компенсация температуры в зависимости от величины ТД. БРОК (его М и Г) должны быть минимальными, так как это влияет на возможность выведения КА (ОК) на орбиту. Ввиду того, что у каждого модулятора сектор и СС различны, предлагается привести единый параметр относительной угловой СС, вычисляемой путем деления ДСС на СС, для корректного сравнения модуляторов.

Опрос экспертов позволил также присвоить вес каждой характеристике из данного перечня. Значения характеристик с указанием веса каждой характеристики для модуляторов электронного сканирования приведены в табл. 2.

Таблица 2

**Характеристики модуляторов
пространственного сканирования**

Модулятор	Показатель, вес показателя						
	ДСС, град, вес 1	СС, мкс, вес 1	ОСС, град/мс, вес 1	Г, см ³ , вес 0,95	М, кг, вес 0,95	ТД, °С, вес 0,9	ВЛР, от 0 до 1, вес 0,9
LMR	90	7	12,86	50	0,02	–50 ÷ 80	1
DMD	60	6000	0,01	900	0,5	–50 ÷ 80	0,9
LCoS	15	12 000	0,00125	500	0,3	10 ÷ 70	0,9

Значения характеристик [14–16], приведенных в табл. 2, использовались с целью выбрать модулятор пространственного сканирования, который наилучшим образом подходил бы для использования на борту КА (ОК) на основе многокритериального многофакторного анализа.

Модуляторы для передачи данных

Модуляторы для КА (ОК) для передачи данных по установленному соединению могут в своей работе основываться на ряде физических эффектов, известных к настоящему времени и наиболее приемлемых для реализации на КА (ОК). Перечень этих эффектов составлен на основе экспертного опроса и включает восемь наименований:

- электроадсорбционный эффект Франца – Келдыша;
- электрооптический эффект Керра;
- электрооптический эффект Погеля;
- электрооптический эффект Маха – Цендера;
- магнитооптический эффект Фарадея;
- магнитооптический эффект Коттона – Муттона;
- магнитооптический эффект Керра;
- акустооптический эффект.

Эффекты, положенные в основу работы модуляторов, обеспечивающих передачу данных по установленному соединению и их обобщенные схемы, представлены в табл. 3 [8–11].

Таблица 3

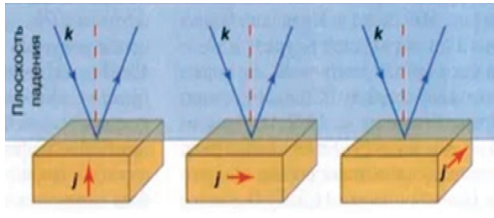
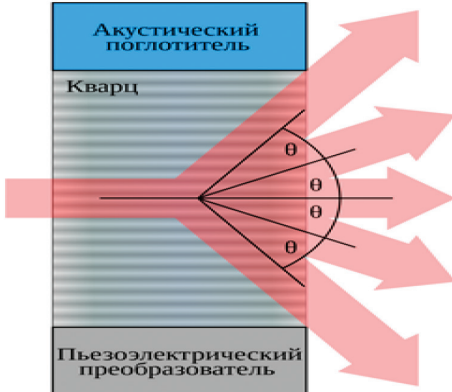
Обобщенные схемы и эффекты в основе работы модуляторов, обеспечивающих передачу данных по установленному соединению

Эффект	Принцип действия	Иллюстрация
Электро-адсорбционный Франца – Келдыша	Туннелирование электронов в запрещенную зону полупроводникового материала во внешнем электрическом поле. При приложении электрического поля к полупроводнику граница зоны поглощения перемещается в область низких энергий	
Электро-оптический Керра	Нелинейное преобразование электрического сигнала в коэффициент преломления изотропного вещества. При этом наблюдается эффект двойного лучепреломления *	
Электро-оптический Поккельса	Линейное преобразование электрического сигнала в коэффициент преломления избранного анизотропного вещества. Вещество: LiNbO3; BaTiO3; Bi4Ti3O12; KNbO3; KTaO3. Наблюдается двойное лучепреломление	

Продолжение табл. 3

Эффект	Принцип действия	Иллюстрация
Электро-оптический Маха – Цендера	Преобразование модулирующего электрического сигнала в разницу скоростей оптических сигналов. Смещение линеаризует характеристику модулятора	
Магнито-оптический Фарадея	Вращение плоскости поляризации света в оптически неактивной среде, находящейся в изменяемом магнитном поле. При этом электрический сигнал преобразуется в сигнал управления магнитным полем и далее в изменение положения плоскости поляризации. Проявляется в полях с $B = 10^{11} - 10^{12}$ Тл	
Магнито-оптический Коттона – Мутона	Преобразование электрического сигнала в сигнал управления магнитным полем и далее – в коэффициент преломления избранного вещества. Вещество: бензол, ацетон, стекловолокно с примесями полупроводников и/или редкоземельных металлов. При этом наблюдается эффект двойного лучепреломления *	

Окончание табл. 3

Эффект	Принцип действия	Иллюстрация
Магнито-оптический Керра	Появление эллиптически поляризованного света при отражении линейно-поляризованного света от поверхности намагниченного ферромагнетика	 Плоскость падения Полярный Меридиональный Экваториальный j – вектор намагниченности; k – волновой вектор
Акусто-оптический	Преобразование электрического сигнала в акустический с последующим изменением показателя преломления среды	 Акустический поглотитель Кварц Пьезоэлектрический преобразователь

* Разница между электрооптическим эффектом Керра и магнитооптическим эффектом Коттона – Мутона в типе прикладываемого поля: в случае эффекта Керра прикладывается электрическое поле (E), а в случае эффекта Коттона – Мутона – магнитное (H).

На базе экспертного опроса для модуляторов, обеспечивающих передачу данных по лазерному лучу при установленном соединении, был составлен перечень характеристик, оказывающих, по мнению экспертов, наибольшее влияние на эффективность их применения на борту КА (ОК). Перечень, предложенный экспертами, включает следующие характеристики:

- скорость передачи информации (СПИ);
- габариты (Γ);
- масса (M);
- температурный диапазон (ТД);
- возможность локализации применительно к условиям России (ВЛР).

Опрос экспертов позволил также присвоить вес каждой характеристике из данного перечня. Значения характеристик [13–15] с указанием их веса для модуляторов, обеспечивающих передачу данных при установленном соединении, приведены в табл. 4.

Таблица 4

**Характеристики и их вес для модуляторов, обеспечивающих передачу
данных по установленному соединению**

Модулятор	Показатель, вес показателя				
	СПИ, Гбит/с, вес 1	Г, см ³ , вес 0,95	М, кг, вес 0,95	ТР, °С, вес 0,9	ВЛР, от 0 до 1, вес 0,9
на основе электроабсорбционного эффекта Франца – Келдыша	40	10	0,01	–20 ÷ 70	1
на основе электрооптического эффекта Керра	10	15	0,025	–55 ÷ 70	1
на основе электрооптического эффекта Погкельса	10	15	0,025	–55 ÷ 70	1
на основе интерферометра Маха – Цендера	10	10	0,025	–55 ÷ 70	1
на основе магнитооптического эффекта Фарадея	5	30	0,5	–55 ÷ 70	0,5
на основе магнитооптического эффекта Коттона – Мутона	5	30	0,5	–55 ÷ 70	0,5
на основе магнитооптического эффекта Керра	10	30	0,5	–55 ÷ 70	0,5
на основе акустооптического эффекта	0,01	25	0,05	–30 ÷ 60	1

Табл. 4 позволяет предоставить исходные данные для аналитических расчетов и, как следствие, обоснованно осуществить выбор типа модулятора с учетом ранга и веса его цифровых характеристик, а также выполняемых им задач.

Аналитические соотношения

Понятие взвешенного ранжирования [12] включает ряд этапов оценивания, в ходе которых экспертным методом обосновывается вес характеристики, а ее ранг задают соответственно порядковому номеру в ряду значений этой характеристики от наихудшего к наилучшему: ранг вычисляют для всех значений, входящих в такое сравнение.

На практике такое ранжирование для m показателей n типов модуляторов осуществляют с использованием следующей стандартной функции MS Excel:

$$\text{РАНГ.РВ}(a_{ij}; \text{массив}[a_{1i}; a_{i,n}]),$$

где a_{ij} – значение i -го показателя для j -го типа модулятора;

массив $[a_{1i}; a_{i,n}]$ – массив значений i -го показателя для всех n типов модуляторов, вошедших в сравнение.

После того как ранг всех показателей для выбранного типа модулятора определены, для каждого типа модулятора находят взвешенную сумму рангов как произведение весов показателей на значения рангов соответствующих характеристик, используя стандартную функцию MS Excel:

СУММПРОИЗВ (массив $[a_{lj}; a_{m,j}]$; массив $[w_{lj}; w_{m,j}]$),

где массив $[a_{lj}; a_{m,j}]$ – массив значений всех m показателей для j -го типа модулятора;

массив $[w_{lj}; w_{m,j}]$ – массив значений всех m весов w показателей для j -го типа модулятора.

Ранжирование модуляторов для пространственного сканирования на основе данных, приведенных в табл. 2, приведено в табл. 5.

Таблица 5

Ранжирование модуляторов для пространственного сканирования

Показатель, вес показателя	LMR	DMD	LCoS
ОСС, град/мкс, вес 1	3	2	1
Г, см ³ , вес 0,95	3	1	2
М, кг, вес 0,95	3	1	2
ТД, °С, вес 0,9	3	3	2
ВЛР, от 0 до 1, вес 0,9	3	2	2
Взвешенная сумма	14,1	7,5	6,6

Из табл. 5 следует, что наиболее подходящим для пространственного сканирования в МСТ является модулятор LMR.

Ранжирование модуляторов, обеспечивающих передачу данных по установленному соединению на основе данных, приведенных в табл. 4, приведено в табл. 6.

Таблица 6

Ранжирование модуляторов, обеспечивающих передачу данных по установленному соединению, по возможности их применения в МСТ

Модулятор	Показатель, вес показателя					Взвешенная сумма
	СПИ, Гбит/с, вес 1	Г, см ³ , вес 0,95	М, кг, вес 0,95	ТР, °С, вес 0,9	ВЛР, от 0 до 1, вес 0,9	
на основе электроабсорбционного эффекта Франца – Келдыша	6	6	6	1	2	14,1
на основе электрооптического эффекта Керра	5	5	5	3	2	14
на основе электрооптического эффекта Погкельса	5	5	5	3	2	14
на основе интерферометра Маха – Цендера	5	4	5	3	2	13,05
на основе магнитооптического эффекта Фарадея	4	3	3	3	1	9,3

Окончание табл. 6

Модулятор	Показатель, вес показателя					Взвешенная сумма
	СПИ, Гбит/с, вес 1	Г, см ³ , вес 0,95	М, кг, вес 0,95	ТР, °С, вес 0,9	ВЛР, от 0 до 1, вес 0,9	
на основе магнитооптического эффекта Коттона – Мутона	4	3	3	3	1	9,3
на основе магнитооптического эффекта Керра	5	3	3	3	1	9,3
на основе акустооптического эффекта	3	4	4	2	2	11,2

Из табл. 6 следует, что наиболее подходящим для передачи данных по установленному соединению в МСТ является модулятор на основе электроабсорбционного эффекта Франца – Келдыша.

Обсуждение результатов

Ввиду существенной неопределенности, которую вносит метод экспертного опроса, результаты проведенного исследования могут оказаться не окончательными. В то же время, в отсутствие других альтернатив, использование предложенного подхода в условиях неопределенности не только в плане характеристик технических средств, но даже весов этих характеристик позволяет выбрать наиболее приемлемый тип модулятора для каждой из задач, выполняемой в ходе установления соединения и передачи данных в МСТ. При обработке результатов экспертного опроса применялась методика Рвачёва [15].

Выводы

Осуществлялся выбор оптических модуляторов для пространственного сканирования и передачи данных в МСТ.

При выборе модуляторов, наиболее точно отвечающих задачам пространственного сканирования и задаче передачи данных по установленному соединению, применялся математический аппарат взвешенного ранжирования, позволяющий осуществить на основе многокритериального анализа обоснованный выбор по совокупности технических характеристик типа модулятора для пространственного сканирования и для передачи данных в МСТ.

Для пространственного сканирования рекомендован модулятор LMR.

Для обеспечения передачи данных по установленному соединению рекомендован модулятор на основе эффекта Франца – Келдыша.

ЛИТЕРАТУРА

1. Пространственные модуляторы света / А.А. Васильев, Д. Касасент, И.Н. Компанец, А.В. Парфёнов. – Москва: Радио и связь, 1987. – 320 с.

2. Рекомендация Международного союза электросвязи G.114 «Время односторонней передачи». – Женева: МСЭ-Т, 2016. – 20 с.
3. Микрозеркальный модулятор для инфракрасных имитационно-моделирующих стендов / И.С. Гибин, В.И. Козик, Е.С. Нежевенко, В.М. Сидоренко [и др.]. – DOI: 10.17212/1814-1196-2018-2-75-84 // Научный вестник НГТУ. – 2018. – № 2(71). – С. 75–84.
4. Рельеф поверхности полиимидных тонкопленочных ориентирующих материалов для жидкокристаллических модуляторов света / Н.В. Каманина, А.С. Тойка, Г.Н. Зверева, П.В. Кужаков [и др.]. – DOI: 10.18083/LCAppl.2021.4.47 // Жидкие кристаллы и их практическое использование. – 2021. – Т. 21, № 4. – С. 47–52.
5. Смирнов, А.Г. Жидкокристаллические пространственно-временные модуляторы оптического излучения, изготовленные по lcos-технологии // Доклады БГУИР. – 2003. – Т. 1, № 1. – С. 19–26.
6. Гущо, Ю.П. Фазированный лидар / Ю.П. Гущо, В.В. Кузнецов, К.В. Шабельник // Оптические технологии, материалы и системы: Сборник докладов ИПТИП РТУ МИРЭА; под ред. А.С. Сигова. – Москва: РТУ МИРЭА, 2022. – С. 258–264. – Текст: электронный // «eLIBRARY.RU»: [сайт]. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=49614240&ysclid=m9bf3kgens355960083> (дата обращения: 10.04.2025).
7. Патент № 2 687 989 Российская Федерация, МПК G02F 1/017 (2006.01), H04B 10/40 (2013.01). Оптическая система связи: № 2017139890: заявл. 16.11.2017: опубл. 17.05.2019 / А.В. Бурага, Ю.П. Гущо, М.А. Гущо, О.Н. Зивенко. – 17 с.
8. Запаский, В.С. Керра эффекты // Большая российская энциклопедия. – Москва, 2009. – Т. 13. – С. 605.
9. Ураксеев, М.А. Магнитооптические эффекты и датчики на их основе / М.А. Ураксеев, Д.А. Марченко, Р.А. Марченко // Датчики и системы. – 2001. – № 1. – С. 31–35.
10. Магнитооптический ИК модулятор в геометрии Фохта / Ю.П. Сухоруков, Н.Н. Лошкарева, А.А. Самохвалов, С.Н. Тугушев // Письма в ЖТФ. – 1996. – Т. 22, вып. 1. – С. 85–90.
11. Якушенков, П.О. Оптические модуляторы света // Фотоника. – 2019. – Т. 13, № 6. – С. 594–602.
12. Сейтова, Г.Е. Метод взвешенного ранжирования для решения задач контролепригодного проектирования последовательностных цифровых устройств // Автоматика и телемеханика. – 1996. – Вып. 8. – С. 154–165.
13. Каталог приборов: Оптические модуляторы. Электрооптика. Акустооптика. – Текст: электронный // Специальные системы. Фотоника: [сайт]. – URL: <https://sphotonics.ru/catalog/upravlenie-lazernym-izlucheniem-elektrooptika-akustooptika/> (дата обращения: 10.04.2025).
14. Пространственные модуляторы света на основе LCD. – Текст: электронный // Ленинградские Лазерные Системы: [сайт]. – 2025. – URL: <https://lenlasers.ru/applying/optics/prostranstvennye-modulyatory-sveta-na-osnove-lcd-i-lcos/> (дата обращения: 10.04.2025).
15. Каталог продукции: Элементы управления излучением. – Текст: электронный // Ленинградские Лазерные Системы: [сайт]. – URL: <https://lenlasers.ru/catalog/elementy-upravleniya-izlucheniem/> (дата обращения: 10.04.2025).

REFERENCES

1. Spatial light modulators / A.A. Vasiliev, D. Casasent, I.N. Kompanets, A.V. Parfenov. – Moscow: Radio and Communications, 1987. – 320 p.
2. International Telecommunication Union Recommendation G.114 “One-way transmission time”. – Geneva: ITU-T, 2016. – 20 p.
3. Micromirror modulator for infrared simulation and modeling stands / I.S. Gibin, V.I. Kozik, E.S. Nezhevenko, V.M. Sidorenko [et al.] – DOI: 10.17212/1814-1196-2018-2-75-84 // Scientific Bulletin of NSTU. – 2018. – No 2(71). – P. 75–84.
4. Surface relief of polyimide thin-film orienting materials for liquid crystal light modulators / N.V. Kamanina, A.S. Toikka, G.N. Zvereva, P.V. Kuzhakov [et al.]. – DOI: 10.18083/LCAppl.2021.4.47 // Liquid crystals and their practical use. – 2021. – Vol. 21, No 4. – P. 47–52.
5. Smirnov, A.G. Liquid crystal space-time modulators of optical radiation manufactured using lcos-technology // Reports of BSUIR. – 2003. – Vol. 1, No 1. – P. 19–26.
6. Gushcho, Yu.P. Phased lidar / Yu.P. Gushcho, V.V. Kuznetsov, K.V. Shabelnik // Optical technologies, materials and systems: Collection of reports of Iptip Rtu Mirea; ed. A.S. Sigov. – Moscow: RTU MIREA, 2022. – P. 258–264. – Text: electronic // eLIBRARY.RU: [website]. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=49614240&ysclid=m9bf3kgens355960083> (date of request: 10.04.2025).
7. Patent No 2 687 989 RF, Int. Cl. G02F 1/017 (2006.01), H04B 10/40 (2013.01). Optical communication system: No 2017139890: Effective date for property rights 16.11.2017: Date of publication 17.05.2019 / Yu.P. Gushcho, A.V. Buraga, M.A. Gushcho, O.N. Zivenko. – 17 p.
8. Zapassky, V.S. Kerra Effects // The Great Russian Encyclopedia. – Moscow, 2009. – Vol. 13. – P. 605.
9. Urakseev, M.A. Magneto-optical effects and sensors based on them / M.A. Urakseev, D.A. Marchenko, R.A. Marchenko // Sensors and systems. – 2001. – No 1. – P. 31–35.
10. Magneto-optical IR modulator in Vokht geometry / Yu.P. Sukhorukov, N.N. Loshkareva, A.A. Samokhvalov, S.N. Tugushev // Letters to ZhTF. – 1996. – Vol. 22, issue. 1. – P. 85–90.
11. Yakushenkov, P. Optical light modulators // Photonics. – 2019. – Vol. 13, No 6. – P. 594–602.
12. Seitova, G.E. Weighted ranking method for solving problems of testable design of sequential digital devices // Automation and telemekhanics. – 1996. – Issue 8. – P. 154–165.
13. Device catalog: Optical modulators. Electrooptics. Acousto-optics. – Text: electronic // Special systems. Photonics: [website]. – URL: <https://sphotronics.ru/catalog/upravlenie-lazernym-izlucheniem-elektrooptika-akustooptika> (date of request: 10.04.2025).
14. Spatial light modulators based on LCD. – Text: electronic // Leningrad Laser Systems: [website]. – URL: <https://lenlasers.ru/applying/optics/prostranstvennyye-modulyatory-sveta-na-osnove-lcd-i-lcos> (date of request: 10.04.2025).
15. Product catalog: Radiation controls. – Text: electronic // Leningrad Laser Systems: [website]. – URL: <https://lenlasers.ru/catalog/elementy-upravleniya-izlucheniem> (date of request: 10.04.2025).