

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ И ФОТОНИКА

УДК 621.376.4:621.3.038:681.78

ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ “ФРАУНГФЕРОВЫХ” СПЕКТРАЛЬНЫХ ДИАПАЗОНОВ И ФЛУОРЕСЦЕНЦИИ В ЗАДАЧАХ НАБЛЮДЕНИЯ И ОПТИЧЕСКОЙ СВЯЗИ

© 2022 г. С. А. Покотило*

Военный инновационный технополис “ЭРА”, Анапа, Россия

*E-mail: era1@mil.ru

Поступила в редакцию 24.12.2021 г.

После доработки 11.01.2022 г.

Принята к публикации 11.01.2022 г.

Рассмотрены новые технические решения систем наблюдения и оптической связи, основанные на использовании “фраунгоферовых” спектральных диапазонов и излучения несущих на длинах волн лазерного излучения, соответствующих фраунгоферовым линиям поглощения, УФ- и ИК-диапазонов с использованием стоковой и антистоковой лазерной флуоресценции.

DOI: 10.56304/S2782375X22010181

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время задача скрытного наблюдения в оптическом диапазоне за различными объектами и организации закрытой оптической связи между различными подвижными и стационарными наземными, надводными, воздушными, космическими и подводными объектами остается как никогда актуальной. Несмотря на широкое применение систем оптической связи и наблюдения [1–3], обеспечивающих обмен информацией между наземными, воздушными, надводными и подводными объектами и состоящих из передающего канала, включающего в себя источник излучения в виде светодиода или лазера и оптическую систему, формирующую оптический пучок или импульс заданной формы, и из приемного канала, включающего в себя объектив и фотоприемник в виде линейки или матрицы чувствительных элементов, их общим недостатком являются низкая помехозащищенность при работе в дневных условиях, характеризующихся высоким уровнем фотонного шума (шума, обусловленного флуктуациями фотонов фонового солнечного излучения в спектральном диапазоне от 0.2 до 2 мкм, значительно превышающем уровень внутреннего шума приемника), демаскировка факта оптической связи и наблюдения в видимом диапазоне оптического излучения. Кроме того, в связи с наличием террористических угроз, антропогенных и техногенных опасностей для жизни и здоровья граждан особую актуальность приобретает задача скрытного обнаружения потенциально опасных объектов и угроз сопровождаемым объектам. Как отмечено в докладе сотрудника организации

“RAND Corporation” Стефана Хосмера (*Stephen Hosmer*) “Операция против вражеских лидеров” (*Operation Against Enemy Leaders*), одним из основных способов устранения негодных лидеров являются “операции, предусматривающие прямое физическое устранение” с использованием Вооруженных сил либо спецслужб США или агентов различных агентств американского разведывательного сообщества.

Первоочередным условием для этого является скрытная и однозначная идентификация VIP-объекта (например, автотранспорта) по обнаруженному на его поверхности флуоресцирующему веществу, обнаруживаемому при подсвете в невидимом глазом диапазоне оптического излучения (например, в инфракрасном или ультрафиолетовом). Для этой цели в качестве приемника излучения могут быть использованы низкоуровневые телевизионные камеры и/или приборы ночного видения (ПНВ), а для приема оптических сигналов в видимом диапазоне – фотоэлектронные умножители с микроканальным усилением. Принимаемый сигнал от визуализируемого объекта в общем случае состоит из отраженного (в диапазоне длин волн излучателя, например, в ИК-диапазоне) и флуоресцентного сигнала, который при антистоковой люминесценции находится в более коротковолновом диапазоне, сдвинутом на 60–100 нм относительно максимума спектрального диапазона излучателя в сторону более коротких длин волн [3].

Цель работы – улучшение помехозащищенности и обеспечение скрытности факта работы систем оптической связи и наблюдения от визуаль-

Таблица 1. Технические данные ЛПФ и некоторых перестраиваемых лазеров, совместимых по длине волны с ЛПФ

Тип активной лазерной среды	Диапазон перестройки длины волны, нм	Обозначение ЛПФ	Поглощающий химический элемент, длина волны ЛПФ, нм	Ширина полосы ЛПФ, нм
ИК-диапазон				
Красители	200–3000		Fe 1074.10	5.0000
<i>НИТС–P(4)</i>	840–940	<i>у</i>	O ₂ 898.77	
<i>НИТС–P(4)</i>	840–940	<i>У</i>	O ₂ 822.70	
<i>ДЕОТС–P(4)</i>	765–875	<i>у</i>	O ₂ 822.70	
AlGaAs	820–870	<i>у</i>	O ₂ 898.77	
			O ₂ 822.70	
УФ-диапазон				
LiCaAlF ₆ : Ce ³	280–330	<i>t</i>	Ni 299.44	
LiF: Ce:Yb ³	304–333	<i>T</i>	Fe 302.11	
LiLuF ₄ : Ce ³⁺ : Yb ³⁺	280–330	<i>P</i>	Ti II 336.11	
Кумарин-102* или любой другой краситель	230–960	<i>N</i>	Fe 358.12	0.2144
Кумарин-102* или любой другой краситель	230–960		Ni 360.10	0.1300
Кумарин-6* или любой другой краситель	230–960		Fe 373.49	0.3027
Родамин-6Ж* или любой другой краситель	230–960		H 379.79	0,3463
Нильский синий*		<i>L</i>	Fe 382.04	0.1712
Кумарин-102*	230–960	<i>K</i>	Ca II 393.37	2.0253
Кумарин-6*		<i>H</i>	Ca II 396.85	1.5467
Родамин-6Ж*				

*Жидкостный лазер.

ного обнаружения за счет использования невидимых глазом участков спектра оптического излучения и источников излучения несущей частоты колебаний на длинах волн, соответствующих фраунгоферовым линиям поглощения.

АНАЛИЗ И ВЫБОР РАБОЧИХ ФРАУНГОФЕРОВЫХ ЛИНИЙ ПОГЛОЩЕНИЯ

Поскольку излучение длин волн, соответствующих линиям поглощения Фраунгофера (ЛПФ), отсутствует в спектре солнечного излучения, достигающего до земной поверхности и отражаемого ею, прием сигналов на этих длинах волн сводит практически к нулю уровень фотонного шума в виде фонового солнечного излучения в смеси с принимаемым полезным сигналом и обеспечивает максимально возможное значение отношения мощности принимаемого сигнала к среднеквадратическому значению мощности шума на выходе фотоприемной матрицы. Этот вид шума является основным шумом, затрудняющим прием оп-

тических сигналов при распространении в атмосфере в дневных условиях [2, 3].

В табл. 1 приведены данные о некоторых ЛПФ и перестраиваемых лазерах, излучение которых по длине волны совпадает с ЛПФ.

Оптическое излучение на ЛПФ целесообразно выделять с помощью интерференционных светофильтров, которые отличаются от абсорбционных и других видов оптических фильтров высоким коэффициентом пропускания (до 0.92) и узкой спектральной полосой пропускания (от 0.1 до 0.15 нм), соизмеримой с шириной спектральных диапазонов ЛПФ, в спектральном диапазоне от 0.25 до 5.00 мкм [2, 3] (табл. 1).

Анализ научной литературы по вопросам использования люминесцентного излучения для наблюдения объектов и результатов проведенных исследований в этой области показал, что при подсвете объекта наблюдения (например, азотным лазером, излучающим на длине волны 337 нм, близким к ЛПФ с длиной волны 336 нм) максимум спектра флуоресцентного излучения наблюдаемого объекта при стоковой люминесценции сдвигается в сторону более длинных волн

на величину до 200 нм, а при антистоксовой люминесценции – на величину 60–100 нм в сторону более коротких длин волн [2, 3, 6]. Кроме того, результаты расчета [2] показали, что описанная технология подсвета и приема оптического излучения от объекта наблюдения обеспечивает дальности наблюдения объектов до 1000 м при условии прямой видимости и при метеорологической дальности видимости не менее 2000 м.

Таким образом, для обеспечения скрытного наблюдения объектов с использованием преимуществ применения возбуждаемого флуоресцентного излучения в стоксовой и в антистоксовой областях в сочетании со скрытным подсветом объекта наблюдения лазерным излучением и приемом излучения, отраженного от объекта, и его возбужденного флуоресцентного излучения на длинах волн, соответствующих ЛПФ, целесообразно использовать один из следующих способов:

- подсвет в невидимом (в ИК или в УФ) диапазоне и прием в стоксовой области ИК-диапазона на фраунгоферовой линии (линиях) поглощения (флуоресцентное и отраженное излучение);

- подсвет в ИК-диапазоне, прием в видимом диапазоне на фраунгоферовой линии (линиях) поглощения в антистоксовой области;

- подсвет в ИК-диапазоне, прием в ИК-диапазоне на фраунгоферовой линии (линиях) поглощения в антистоксовой области;

4) подсвет на одной фраунгоферовой линии (линиях) поглощения, а прием – на другой фраунгоферовой линии (линиях) поглощения;

5) для обеспечения абсолютно скрытного обнаружения флуоресцирующего объекта необходимы его подсвет в невидимом визуальном диапазоне и прием флуоресцентного излучения тоже в невидимом диапазоне.

ТЕХНИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ СИСТЕМ НАБЛЮДЕНИЯ И ОПТИЧЕСКОЙ СВЯЗИ НА ЛПФ

Устройство визуализации объекта [4]. Для достижения поставленной цели в устройство визуализации объекта, содержащее входную оптическую систему (далее – объектив), антистоксовый преобразователь частоты оптического излучения, фотоприемную матрицу, блок обработки сигналов и монитор, вводят источник подсвета объекта, оптическую систему, формирующую лазерный пучок подсвета объекта (передающая оптическая система) и узкополосный интерференционный фильтр, установленный в приемном канале на входе фотоприемной матрицы, спектральный диапазон пропускания которого согласован со спектром излучения объекта и со спектральным диапазоном работы фотоприемной

матрицы. При этом антистоксовый преобразователь частоты оптического излучения предварительно нанесен на наблюдаемый объект в виде метки, в качестве источника подсвета объекта использован перестраиваемый по частоте лазер, излучающий в ИК-диапазоне и возбуждающий флуоресцентное свечение антистоксового преобразователя на длине волны, совпадающей по крайней мере с одной из главных ЛПФ *A, B, C*, а в качестве фотоприемной матрицы использован электронно-оптический преобразователь на арсениде галлия (GaAs), диапазон спектральной чувствительности которого находится в пределах от 650 до 1200 нм [4].

Устройство визуализации включает в себя следующие функциональные элементы (рис. 1): *1* – перестраиваемый по частоте лазер, *2* – формирующая оптическая система, *3* – объект визуализации, *4* – антистоксовый преобразователь частоты оптического излучения, *5* – интерференционный фильтр, *6* – входная оптическая система, *7* – фотоприемная матрица, *8* – блок обработки сигналов, *9* – монитор, *10* – наблюдатель. При этом антистоксовый преобразователь частоты расположен на наблюдаемом объекте, лазер излучает в ИК-диапазоне, а фотоприемная матрица принимает излучение объекта на длине волны, соответствующей одной из главных ЛПФ.

Устройство работает следующим образом. Перестраиваемый по частоте лазер *1* с помощью формирующей оптической системы *2* облучает антистоксовый преобразователь частоты *4*, расположенный на визуализируемом объекте *3*. Возбужденное лазерным излучением флуоресцентное излучение антистоксового преобразователя частоты *4* происходит на длине волны, соответствующей одной из ЛПФ *A, B, C*, в спектральном диапазоне от 656.3 до 762.1 нм, и воспринимается фотоприемной матрицей *7* через интерференционный фильтр *5* и приемную оптическую систему *6*, что обеспечивает высокую помехозащищенность принимаемого сигнала. С выхода фотоприемной матрицы *7* электрические сигналы изображения поступают в блок обработки сигналов *8*, где подвергаются электронной обработке – усилению и фильтрации – с целью повышения отношения сигнал/шум и подаются на монитор *9*, на экране которого оператор наблюдает изображение объекта *3* по флуоресцирующей метке *4*.

Скрытность наблюдения объекта обеспечивается подсветом объекта лазерным излучением в ИК-диапазоне, не воспринимаемым глазом стороннего наблюдателя, и приемом флуоресцентного излучения объекта в узком спектральном диапазоне, воспринимаемого высокочувствительной фотоприемной матрицей, например электронно-оптическим преобразователем, и также не воспринимаемым глазом стороннего

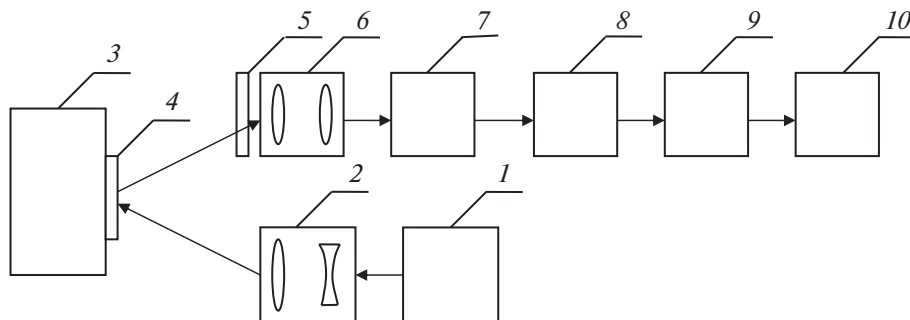


Рис. 1. Функциональная схема устройства визуализации объекта.

наблюдателя. Кроме того, флуоресцентное излучение объекта на одной из ЛПФ исходит только от этого объекта и более ни от какого другого элемента фона, окружающего этот объект. Этим достигается максимально возможное отношение сигнал/фотонный шум в наблюдаемом изображении объекта.

Аналоговая система оптической связи [5]. В системе оптической связи, содержащей передающий канал, состоящий из формирующей оптической системы, в фокальной плоскости которой расположен дискретный набор лазерных излучателей, и приемный канал, содержащий расположенные один за другим фокусирующий объектив и фотоприемник, лазерные излучатели (один или несколько) выполнены перестраиваемыми по длине волны, каждый из которых генерирует оптическое излучение на длине волны, соответствующей одной из ЛПФ. В передающий канал введен блок управления длиной волны (контроллер) лазерных излучателей, а в приемный канал введен один или несколько узкополосных фильтров, каждый из которых пропускает излучение в узком спектральном диапазоне, причем максимальное значение коэффициента пропускания фильтра соответствует длине волны одной из ЛПФ, при этом излучение лазера, узкополосный фильтр и фотоприемник согласованы по спектральному диапазону работы. Для обеспечения скрытности лазерной линии связи передающий и приемный каналы работают в ИК- и/или в УФ-диапазоне оптического излучения на длинах волн, соответствующих ЛПФ. Модулирующий (информационный) сигнал может быть звуковым, сверхвысокочастотным или какого-либо другого диапазона спектра электромагнитных волн.

Благодаря применению для передачи информации оптического излучения на длинах волн, соответствующих ЛПФ, также достигают максимально возможного значения отношения сигнал/фотонный шум на выходе приемного канала системы оптической связи.

Цифровая система оптической связи [6]. Современным цифровым системам оптической связи,

содержащим, как правило, модулятор и оптический передатчик, соединенные последовательно, оптоэлектронный приемник, аналого-цифровой преобразователь (АЦП) и цифровой демодулятор, соединенные последовательно, присущи следующие недостатки [5]:

- передача и прием информационных сигналов осуществляются на одной несущей частоте, что не всегда может обеспечить требуемое отношение сигнал/шум в принимаемом сообщении;
- невозможность передачи и приема информационных сигналов на нескольких несущих одновременно и их цифровой обработки;
- существующие оптоэлектронные приемники не могут одновременно работать в УФ- и ИК-диапазонах длин волн оптического излучения;
- низкая помехозащищенность при работе в дневных условиях, характеризующихся высоким уровнем флуктуаций фотонов фона, обусловленного солнечным излучением;
- демаскировка факта оптической связи в видимом диапазоне оптического излучения.

Для улучшения помехозащищенности и пропускной способности системы оптической связи и обеспечения скрытности ее работы от визуального наблюдения в цифровую систему оптической связи, содержащую модулятор и оптический передатчик, соединенные последовательно, оптоэлектронный приемник, АЦП и цифровой демодулятор, соединенные последовательно, при этом выход оптического передатчика и вход оптоэлектронного приемника соединены оптическим каналом связи, предлагается ввести блок контроллеров оптического передатчика, соединенный с его управляющими входами, и блок перестраиваемых оптических фильтров, установленный на входе оптоэлектронного приемника [6]. Оптоэлектронный приемник выполнен в виде последовательно оптически сопряженных приемной оптической системы и блока приемников ультрафиолетового и инфракрасного рабочих спектральных диапазонов, выходы которых соединены со входами многоканального АЦП. Оп-

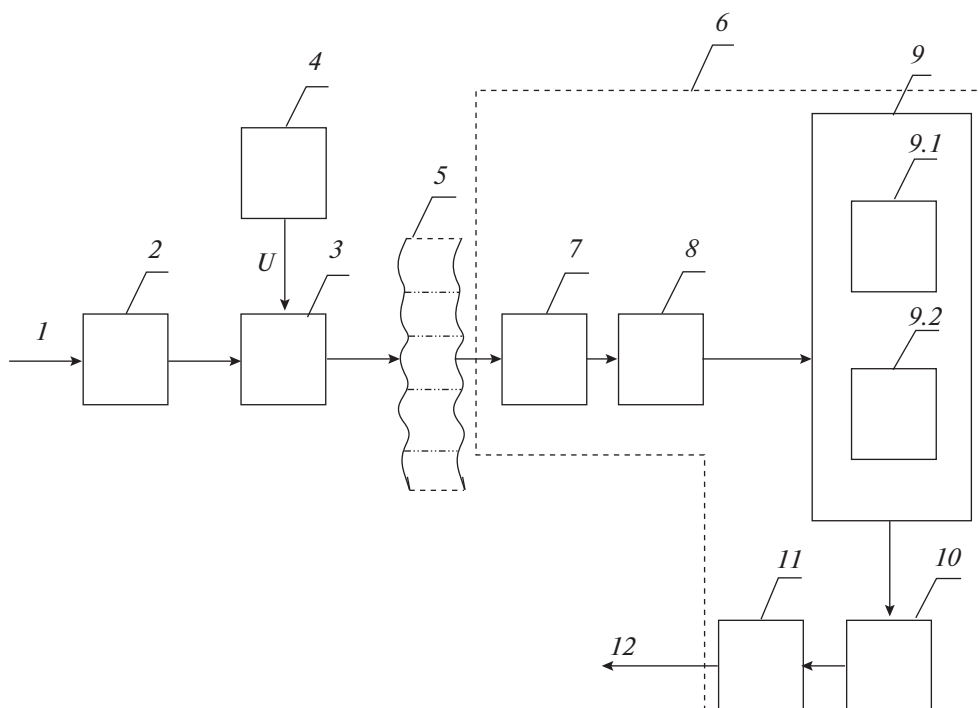


Рис. 2. Функциональная схема цифровой системы атмосферной оптической связи.

тический передатчик выполнен в виде набора перестраиваемых по частоте УФ- и ИК-лазеров, управляющие входы которых соединены соответственно с выходами контроллера УФ- и ИК-лазера. Информационным сигналом модулируют одновременно излучение оптического передатчика на нескольких несущих частотах, которое одновременно принимают несколькими УФ- и ИК-приемниками. Блок перестраиваемых оптических фильтров выполнен в виде набора узкополосных интерференционных светофильтров, согласованных по спектру с несущими частотами принимаемых информационных сигналов и выполненных с возможностью плавной перестройки полосы пропускания, как, например, запатентованный в 1990 г. в составе атмосферно-адаптивной оптико-электронной системы наблюдения специального назначения клиновидный интерференционный фильтр, обеспечивающий плавную перестройку спектрального диапазона работы системы наблюдения, применяемую при изменении состояния атмосферы. Модернизированный вариант такого интерференционного светофильтра использован для защиты лазерной системы наблюдения от обратного рассеяния атмосферы [7]. Несущие частоты излучения оптического передатчика согласованы по электромагнитному спектру с ЛПФ в УФ- и ИК-диапазонах оптического излучения. Оптикоэлектронный приемник обеспечивает прием информационных сигналов на несущих частотах УФ- и ИК-излуче-

ния в нескольких спектральных диапазонах, соответствующих ЛПФ. При этом передача и прием информационных сигналов осуществляются через атмосферный оптический канал связи. В цифровой системе атмосферной оптической связи предусмотрена передача информационного сигнала на нескольких несущих частотах оптического диапазона, совпадающих с узкими спектральными диапазонами, в которых находятся ЛПФ. Это позволяет, с одной стороны, избавиться от влияния фотонного шума от солнечного излучения на фраунгоферовых линиях, т.е. существенно улучшить помехозащищенность системы оптической связи, а с другой стороны, существенно увеличить отношение сигнал/шум, так как при приеме одного и того же информационного сигнала на n несущих частотах сигналы суммируются линейно, а аддитивные шумы в смеси с полезным сигналом – среднеквадратично, в результате чего отношение сигнал/шум на выходе оптикоэлектронного приемника возрастает в корень квадратный из числа n суммируемых сигналов разных несущих частот.

Функциональная схема цифровой системы атмосферной оптической связи представлена на рис. 2, а на рис. 3 представлен блок оптического передатчика. Функциональная схема включает в себя следующие функциональные элементы (рис. 2, 3): 1 – входной информационный сигнал, 2 – модулятор оптического излучения, 3 – оптический передатчик, 3₁ – перестраиваемый по ча-

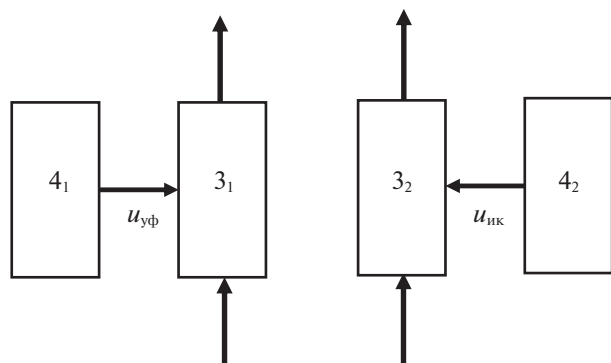


Рис. 3. Функциональная схема блока оптического передатчика.

стоте УФ-лазер, 3_2 – перестраиваемый по частоте ИК-лазер, 4 – блок контроллеров оптического передатчика, 4_1 – контроллер УФ-лазера, 4_2 – контроллер ИК-лазера; $u = [u_{уф}, u_{ик}]$ – вектор управляющих сигналов контроллера оптического передатчика, $u_{уф}$ – управляющий сигнал УФ-лазера; $u_{ик}$ – управляющий сигнал ИК-лазера, 5 – атмосферный оптический канал связи, 6 – цифровой оптический приемник, 7 – блок перестраиваемых оптических фильтров, 8 – приемная оптическая система, 9 – блок приемников УФ- (9_1) и ИК- (9_2) излучения, 10 – многоканальный АЦП, 11 – цифровой демодулятор, 12 – выходной цифровой сигнал. Блок контроллеров оптического передатчика соединен с управляющими входами оптического передатчика 3 , блок перестраиваемых оптических фильтров установлен на входе оптоэлектронного приемника, оптоэлектронный приемник выполнен в виде последовательно оптически сопряженных приемной оптической системы и блока приемников ультрафиолетового и инфракрасного рабочих спектральных диапазонов оптического излучения, выходы которых соединены со входами АЦП, который выполнен многоканальным. Оптический передатчик выполнен в виде набора перестраиваемых по частоте УФ- и ИК-лазеров, управляющие входы которых соединены соответственно с выходами контроллера УФ- и ИК-лазера.

В цифровой системе атмосферной оптической связи предусмотрена передача информационного сигнала на нескольких несущих частотах оптического диапазона, которые совпадают со спектральными диапазонами, соответствующими спектральным диапазонам ЛПФ. Это позволяет, с одной стороны, избавиться от влияния фонового (фотонного) шума от солнечного излучения на фраунгоферовых линиях, т.е. существенно улучшить помехозащищенность системы связи, а с другой стороны, еще больше увеличить отношение сигнал/шум, так как при приеме одного и того же информационного сигнала на n несущих ча-

стотах сигналы суммируются линейно, а аддитивные шумы в смеси с полезным сигналом – среднеквадратично, в результате чего отношение сигнал/шум на выходе оптоэлектронного приемника возрастает в корень квадратный из n раз.

ВЫВОДЫ

Для организации скрытного наблюдения и скрытной связи целесообразно использовать подсвет и передачу информации на длинах волн, совпадающих с фраунгоферовыми линиями поглощения, в УФ- и ИК-диапазонах спектра оптического излучения. Созданные к настоящему времени лазеры (подсветчики и передатчики) и приемники оптического излучения по достигнутым параметрам позволяют решать задачи скрытного наблюдения и скрытной связи с высокой эффективностью в любое время суток.

Использование явления антистоксовой флуоресценции позволяет обнаруживать скрытые от визуального наблюдения фрагменты обзорываемой поверхности, т.е. визуализировать их.

Предложенные схемы устройства визуализации и систем атмосферной оптической связи, использующие «фраунгоферовы» спектральные диапазоны оптического излучения и явление лазерной флуоресценции, отличаются от известных значительно более высокой помехозащищенностью и абсолютной скрытностью факта функционирования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Волков С.А., Овсянкин С.В. // Техника радиосвязи. 2016. № 1. С. 64.
2. Покотило С.А., Снегирев А.Л., Ефремов А.В., Еса-ян А.О. // Вестник Военного инновационного технополиса «ЭРА». 2021. Т. 2. № 2. С. 77.
3. Покотило С.А., Хабибулин Н.Ф., Снегирев А.Л. // Телекоммуникации. 2021. № 3. С. 2.
4. Патент № 2730371, Российская Федерация, МПК G01F 1/00, H04N 5/33. Устройство визуализации объекта: заявка № 2019132383; заявл. 11.10.2019; опубл. 21.08.2020 / Покотило С.А., Снегирев А.Л., Гусеница Я.Н. и др.
5. Патент № 2744941, Российская Федерация, МПК H04B 7/00. Система оптической связи: заявка № 2020101994; заявл. 17.01.2020; опубл. 17.03.2021 / Хабибулин Н.Ф., Покотило С.А., Снегирев А.Л. и др.
6. Патент № 2757997, Российская Федерация, МПК H04B 7/00, H04B 10/00. Цифровая система атмосферной оптической связи: заявка № 2020123187; заявл. 07.07.2020; опубл. 25.10.2021 / Хабибулин Н.Ф., Покотило С.А., Овсянкин С.В. и др.
7. Заявка № 2021125878, Российская Федерация, МПК G01S 7/00. Лазерная система наблюдения: заявл. 31.08.2021 / Покотило С.А., Снегирев А.Л., Ефремов А.В., Ляскин А.С.