

ЭЛЕКТРОННАЯ КОМПОНЕНТНАЯ БАЗА, ФОТОНИКА И ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

УДК 621.3.038

ОЦЕНКА ПРЕИМУЩЕСТВ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ УЛЬТРАФИОЛЕТОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ЛИНИЯХ ПОГЛОЩЕНИЯ ФРАУНГЕФЕРА В СИСТЕМАХ НАБЛЮДЕНИЯ

© 2021 г. С.А. Покотило, А.Л. Снегирев, А.В. Ефремов, А.О. Есяян

ФГАУ «Военный инновационный технополис «ЭРА», Анапа, Россия

Проанализирована возможность и показана целесообразность решения проблемы улучшения помехоустойчивости и обеспечения скрытности оптического наблюдения применительно к робототехническим комплексам военного назначения воздушного базирования за счет использования в атмосферно-оптических каналах наблюдения узких спектральных диапазонов ультрафиолетового участка спектра оптического излучения, соответствующих фраунгоферовым линиям поглощения.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время актуальной остаётся задача организации скрытного оптического наблюдения объектов, расположенных на фоне земной или водной поверхности. Особенно актуальной эта задача становится применительно к робототехническим комплексам (РТК) военного назначения (ВН) воздушного базирования. Несмотря также и на широкое применение систем дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), обеспечивающих формирование цифровых изображений земной поверхности, их общим недостатком является низкая помехозащищённость при работе в дневных условиях, характеризующихся высоким уровнем фотонного шума, обусловленного флуктуациями фотонов фонового солнечного излучения в спектральном диапазоне от 0.2 до 2 мкм, значительно превышающим уровень внутреннего шума фотоприемника [1]. Эта задача ранее уже ставилась применительно к системам оптической связи и локации [1, 3, 4]. В частности, в работах [3, 4] обоснована целесообразность использования узких спектральных участков оптического излучения, соответствующих фраунгоферовым линиям поглощения, для решения задачи организации закрытой оптической связи, и разработаны схемные решения аналоговых и цифровых систем атмосферной оптической связи. Однако в подобном контексте применительно к системам оптического наблюдения для решения задач ДЗЗ применительно к РТК ВН эта задача до настоящего времени не ставилась и не решалась.

Цель работы – определение условий улучшения помехозащищённости системы оптического наблюдения за счёт использования нескольких узких спектральных диапазонов ультрафиолетового (УФ) участка спектра оптического излучения, соответствующих фраунгоферовым линиям поглощения.

АНАЛИТИКО-МЕТОДИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Фраунгоферовы линии поглощения (ФЛП) – это линии поглощения в спектре солнечного излучения определённых длин волн из сплошного солнечного спектра излучения химическими элементами, составляющими атмосферу Солнца (фотосферу). В настоящее время в спектральном диапазоне от 293.5 нм до 1349.5 нм современные приборы различают около 26 тыс. ФЛП [3, 4]. Излучение длин волн, соответствующих линиям поглощения Фраунгофера, отсутствует в спектре солнечного излучения, доходящего до земной поверхности и отражаемого ею. Поэтому 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, затрудняющим приём оптических сигналов при распространении в атмосфере в дневных условиях.

Таблица 1. Данные о некоторых самых сильных ФЛП УФ-диапазона оптического излучения в спектре Солнца

№ п/п	Длина волны λ , нм	Ширина спектрального диапазона $\Delta\lambda$, нм	$\Delta\lambda/\lambda$, $\times 10^{-4}$	Поглощающий атом
1	358.1209	0.2144	5.99	Fe
2	371.9947	0.1664	5.34	Fe
3	373.4874	0.3027	9.45	Fe
4	373.7141	0.0071	4.28	Fe
5	374.5574	0.1202	4.59	Fe
6	374.9495	0.1907	5.78	Fe
7	375.0150	0.1388	4.30	H
8	375.8245	0.1647	4.97	Fe
9	377.0630	0.1860	6.21	H
10	379.7900	0.3463	10.85	H

В таблице 1 приведены данные о некоторых самых сильных ФЛП УФ-диапазона оптического излучения в спектре Солнца, представляющих потенциальный интерес для решения задач дистанционного зондирования земной и водной поверхности [3, 4].

В результате анализа данных таблицы 1 можно сделать вывод о том, что самыми сильными линиями поглощения являются линии с наибольшими (например, больше 5) значениями показателя $\Delta\lambda/\lambda$, к которым можно отнести линии под номерами 1–3, 6, 9, 10. В спектральных диапазонах под указанными номерами будут обеспечены наибольшие уровни принимаемых сигналов.

В таблице 2 приведены данные о некоторых перестраиваемых по частоте лазерах с указанием диапазонов перестройки длины волны и данные о фраунгоферовых линиях поглощения с указанием соответствующих им длин волн, величин ширины спектральной полосы поглощения и поглощающих химических элементов [2].

Оптическое излучение на фраунгоферовых линиях поглощения целесообразно выделять с помощью интерференционных светофильтров (ИСФ), которые отличаются высоким коэффициентом пропускания (до 0.92) и спектральной полосой пропускания от 20 нм до 0.1 нм. При этом следует отметить, что величины ширины полос спектрального пропускания ИСФ соизмеримы с величинами ширины полос спектрального поглощения фраунгоферовых линий (см. таблицу 2).

Коэффициент пропускания оптического излучения атмосферой в УФ-диапазоне зависит, главным

Таблица 2. Данные ФЛП и характеристиках некоторых перестраиваемых лазеров, совместимых по длине волны с ФЛП, в УФ-диапазоне

Тип активной лазерной среды	Диапазон перестройки длины волны, нм	Обозначение ФЛП	Поглощающий химический элемент, длина волны ФЛП, нм	Ширина полосы ФЛП, нм
LiCaAlF ₆ :Ce ³⁺	280...330	<i>t</i>	Ni 299.44	–
LiLuF ₄ :Ce ³⁺ :Yb ³⁺	280...330	<i>P</i>	Ti II 336.11	–
Кумарин-102*	230...960	<i>N</i>	Fe 358.12	0.2144
Кумарин-102* и другие	230...960	–	Ni 360.10	0.1300
Кумарин-6* и другие	230...960	–	Fe 373.49	0.3027
Родамин-6Ж* и другие	230...960	–	H 379.79	0.3463
Нильский синий*	230...960	<i>L</i> <i>K</i>	Fe 382.04 Ca II 393.37	0.1712 2.0253
Кумарин-102*	230...960	<i>H</i>	Ca II 396.85	1.5467

Примечание: * Жидкостный лазер

образом, от концентрации молекул озона O₃ в приземном слое атмосферы.

УФ-диапазон, особенно от 0.3 до 0.4 мкм, интересен также и тем, что в нем при отсутствии солнечного излучения лучше, чем в видимом и в инфракрасном диапазонах, наблюдаются объекты, расположенные на заснеженной поверхности, и флуоресцирующие объекты, а также обнаруживаются коронные разряды линий электропередачи и факелы ракетных двигателей, что делает этот диапазон привлекательным для обнаружения воздушных средств нападения и для дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), особенно в районах Крайнего Севера, Арктики и Антарктиды.

Как известно, в диапазоне длин волн от 0,2 мкм до 14,0 мкм в атмосфере имеются так называемые «окна прозрачности» – участки спектра, в которых поглощение излучения минимально. В инфракрасной области их несколько: 0.95...1.06; 1.2...1.3; 1.5...1.8; 2.1...2.4; 3.3...4.0; 8.0...14.0 мкм. В УФ- и видимом диапазонах «окна прозрачности» не столь ярко выражены, но они тоже имеются. При этом каждое «окно прозрачности» состоит из многих тысяч отдельных линий поглощения.

На отдельных участках «окон прозрачности» расположено множество «микроокон прозрачности», расположенных между слабыми линиями поглощения. Именно эти «микроокна», совпадающие с длинами волн излучения лазеров подсвета зем-

ной поверхности или расположенные вблизи них, представляют интерес для ДЗЗ.

В УФ-диапазоне длин волн наблюдается сильное поглощение излучения молекулами озона. Известно, что озоновый слой Земли распределён по высотам неравномерно – на высотах от 15 до 40 км находится примерно 90% общего содержания озона в атмосфере и только 10% – на высотах до 15 км. Таким образом, основное поглощение молекулами озона солнечного излучения в ультрафиолетовой области спектра от 0.3 до 0.4 мкм происходит в стратосфере и в меньшей степени – в тропосфере.

Интерес вызывает сравнительная оценка максимально возможных высот ДЗЗ при лазерном подсвете на длинах волн УФ-спектра, на которых отсутствует поглощение излучения озоновым слоем атмосферы Земли (линии Фраунгофера), и на длинах волн, которые поглощаются озоновым слоем Земли. В связи с этим предполагается, что ДЗЗ проводится с высот не выше 15 км.

В данной работе рассматривается моностатическая система оптического наблюдения, в которой, в отличие от бистатической, источник излучения и приёмник конструктивно устанавливаются в одном месте.

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ РАСЧЁТ СИСТЕМЫ ЛАЗЕРНОГО НАБЛЮДЕНИЯ

В системе лазерного наблюдения лазерное излучение проходит через слой атмосферы, ослабляется в ней вследствие поглощения атмосферными газами и рассеяния на частицах аэрозоля и попадает на объект наблюдения. Часть излучения отражается этим объектом в сторону приёмника оптического излучения (ПОИ). Отражённый сигнал воспринимается с помощью приёмной оптики и направляется на ПОИ, который преобразует его в электрический сигнал, пропорциональный мощности принятого излучения. Для расчёта мощности принимаемого излучения необходим учёт многих факторов, которые сложным образом зависят от состояния атмосферы, параметров источника и приёмника излучения и трассы прохождения излучения от излучателя до земной поверхности и обратно.

Целостной модели, пригодной для расчёта влияния атмосферы на прохождение через неё оптического излучения, не существует. Ввиду этого использовалась параметрическая модель с заданными параметрами лазера, приёмного устройства и атмосферы [2].

Работа оптических систем наблюдения при ДЗЗ в УФ- и в видимом диапазонах всегда сопровождается наличием шумов, условно разделяемых на внешние и внутренние. Внешние шумы обусловлены обратным рассеянием лазерного излучения атмосферой и рассеянием излучения, отраженного от земной поверхности. Внутренние шумы обусловлены шумами ПОИ и шумами усилительного устройства. В работе принималось, что обнаружение сигнала происходит при превышении им некоторого порогового значения $\Phi_{\text{пор}}$, т.е. максимальная высота применения системы оптического наблюдения оценивается, исходя из условия равенства мощности полезного оптического сигнала, приходящего на приёмник оптического сигнала, и пороговой мощности (мощности шума) приёмника.

В случае замутнённой атмосферы аналитическая формула для средней мощности Φ лазерного локационного сигнала и при условии, что размер зондируемого объекта значительно превышает размер лазерного пятна на его поверхности, имеет следующий вид [2]:

$$\Phi \cong \frac{A\Phi_0\tau_{a1}\tau_{a2}\tau_{\text{фо}}\tau_{\text{пр}}\pi r_{\text{по}}^2}{h^2}, \quad (1)$$

где A – альbedo подстилающей земной поверхности; Φ_0 – мощность излучения лазерного источника; $\tau_{\text{фо}}$, $\tau_{\text{пр}}$ – коэффициенты пропускания формирующей и приёмной оптической системы; h – высота оптического наблюдения; τ_{a1} , τ_{a2} – коэффициенты пропускания атмосферы на трассе «лазер – земная поверхность» и «земная поверхность – лазер»; $r_{\text{по}}$ – радиус входного отверстия приёмного объектива.

Полученная формула позволяет рассчитать среднюю мощность отражённого от земной поверхности лазерного сигнала, поступающего на приёмник, в зависимости от высоты наблюдения и построить соответствующие зависимости, задаваясь характеристиками лазерной системы, совмещённой с приёмным устройством, и атмосферы.

В качестве приёмников в лазерных системах обычно используются фотоэлектронные умножители (ФЭУ), т.к. среди других типов приёмников они обладают наибольшей чувствительностью в УФ- и в видимой областях и наименьшими собственными шумами.

В общем случае пороговую мощность приём излучения, можно выразить формулой [2]:

$$\Phi_{\text{пор}} = \frac{\mu \left[2e(I_t + I_{\phi})(1+B)\Delta f \right]^{\frac{1}{2}}}{S_k}, \quad (2)$$

где μ – отношение сигнал/шум; $e = 1.6 \cdot 10^{-19}$ А·с – заряд электрона; $(1 + B) \cong 2.5$, где B – коэффициент увеличения шумов, обусловленных вторичной эмиссией; Δf – эффективная полоса частот фотоприёмного устройства, Гц; S_k – интегральная чувствительность фотокатода ФЭУ, А/Вт; I_t – темновой ток фотокатода, А; I_ϕ – среднее значение тока, обусловленного фоновой засветкой, А.

Для лазера с узким полем зрения и узкополосным спектральным фильтром выражение для I_ϕ имеет [2]:

$$I_\phi = \tau_{\text{пр}} L_\phi S_k A_{\text{но}} \frac{A_{\text{пр}}}{f^2} \Delta\lambda, \quad (3)$$

где $\tau_{\text{пр}}$ – коэффициент пропускания оптической системы приёмного канала, который определяется как $\tau_{\text{пр}} = \tau_0 \cdot \tau_{\text{иф}}$, где τ_0 , $\tau_{\text{иф}}$ – коэффициенты пропускания оптической системы и интерференционного светофильтра соответственно; L_ϕ – спектральная яркость фонового излучения; $A_{\text{но}}$ – площадь входного отверстия приёмной оптической системы; $\frac{A_{\text{пр}}}{f^2}$ – мгновенный телесный угол поля зрения приёмной оптической системы, где $A_{\text{пр}}$ – площадь чувствительного элемента матрицы приёмника; f – фокусное расстояние приёмного объектива; $\Delta\lambda$ – полоса пропускания спектрального фильтра, равная ширине линии Фраунгофера на длине волны 379.79 нм (см. таблицу 1).

В работе проведена оценка предельной высоты h зондирования для лазерных систем, работающих на длинах волн 378.00 нм и 379.79 нм (линия поглощения Фраунгофера). При этом величина L_ϕ для случая работы лазерной системы на длине волны 379.79 нм принималась равной нулю, т.к. солнечное излучение на этой длине волны не доходит до земной поверхности.

Величина L_ϕ для длины волны 378.00 нм может быть определена по формуле $L_\phi = 0,5S_\lambda$ (где S_λ – спектральная солнечная постоянная для длины волны λ) с учётом данных, приведенных в [2] и равна при заданных параметрах атмосферы $0,71 \cdot 10^{-6}$ Вт/(м² мкм).

Задаваясь величинами $\tau_{\text{пр}} = 0,28$ (при $\tau_0 = 0,47$, $\tau_{\text{иф}} = 0,64$) $S_k = 100$ мА/Вт; $\alpha = 2$ мрад; $r_{\text{но}} = 5 \cdot 10^{-2}$ м; $\Delta\lambda = 0,35$ нм, получаем среднее значение тока, обусловленного фоновой засветкой на длине волны 378.00 нм:

$$I_\phi = 0,7 \cdot 10^{-14} \text{ мА.}$$

Для длины волны 379.79 нм яркость фонового излучения будет близка к нулю, а шумы будут обусловлены темновым током ФЭУ. В расчётах принималось, что $I_t = 10^{-16}$ А.

Тогда по формуле (2) получаем для пороговой мощности лазерной системы наблюдения в УФ-области спектра:

$$\Phi_{\text{пор1}} = 4,4 \cdot 10^{-10} \text{ Вт (длина волны 378.00 нм);}$$

$$\Phi_{\text{пор2}} = 5,0 \cdot 10^{-13} \text{ Вт (длина волны 379.79 нм).}$$

Как видно из сравнения полученных расчётных значений пороговой мощности на длине волны 378.00 нм пороговая мощность почти на 3 порядка превышает пороговую мощность для длины волны 379.79 нм.

По формуле (1) была рассчитана зависимость мощности отражённого лазерного импульса, попадающего в приёмный оптический тракт, от высоты ДЗЗ. При расчётах влияние турбулентности атмосферы на лазерный сигнал не учитывалось ввиду небольших высот ДЗЗ. С другой стороны, ввиду близости по спектру рассматриваемых длин волн считалось, что атмосфера оказывает на них одинаковое влияние.

Как следует из рассмотрения рис. 1, предельная высота ДЗЗ h_2 на длине волны 379.79 нм составляет 9,6 км, а на длине 378.00 нм $h_1 = 7,2$ км.

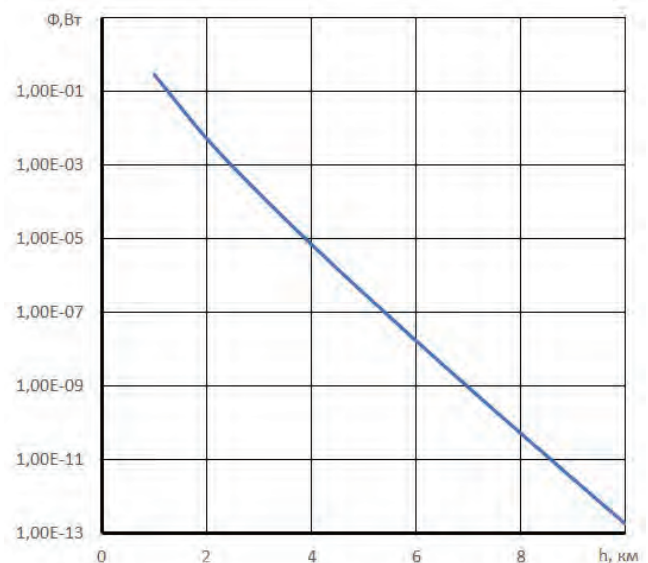


Рис. 1. Зависимость мощности полезного лазерного сигнала и пороговых мощностей от высоты ДЗЗ $\Phi(h)$ для длин волн УФ-излучения 378,00 и 379,79 нм: $\Phi_{\text{пор1}}$, $\Phi_{\text{пор2}}$ – пороговые потоки при длинах волн 378,00 и 379,79 нм соответственно

Расчёты проводились для вертикальной трассы наблюдения при метеорологической дальности видимости 50 км («отличная» по Международной шкале видимости), безоблачном небе и зенитном угле Солнца 45° [2]. Альbedo отражающей поверхности, не зависящее от длины волны, принято равным 0.2. Мощность импульса лазера принималась равной 10^6 Вт (энергия импульса 10^{-3} Дж, длительность импульса 10^{-9} с). Угол расходимости излучения лазера составил 1 мрад, угол поля зрения приёмной оптической системы – 2 мрад. Отношение сигнал/шум принималось равным 10. Коэффициент пропускания $\tau_{\text{фо}}$ формирующей оптики был принят равным 0.85; эффективная полоса частот фотоприёмного устройства $\Delta f = 5 \cdot 10^6$ Гц.

Коэффициенты пропускания атмосферы τ_{a1}, τ_{a2} на трассах «лазер – земная поверхность» и «земная поверхность – лазер» были найдены из выражения:

$$\tau_{a1} = \tau_{a2} = \exp(-\beta \cdot h), \quad (4)$$

где h – высота зондирования, км; β – показатель аэрозольного ослабления атмосферой, принятый в расчётах равным $1.3 \cdot 10^{-3} \text{ км}^{-1}$, исходя из допущения о высокой прозрачности атмосферы.

СХЕМНОЕ РЕШЕНИЕ ЦИФРОВОЙ ЛАЗЕРНОЙ СИСТЕМЫ НАБЛЮДЕНИЯ

Современным цифровым системам оптического наблюдения и связи, содержащим приемную оптическую систему, оптоэлектронный приёмник, аналого-цифровой преобразователь и запоминающее устройство, присущи следующие недостатки [3, 4]:

- ДЗЗ осуществляются в широких спектральных диапазонах, что не всегда обеспечивает требуемое отношение сигнал/шум в формируемом изображении;
- Низкая помехозащищённость при работе в дневных условиях, характеризуемых высоким уровнем флуктуаций фотонов фона, обусловленных солнечным излучением.

Для улучшения помехозащищённости и пропускной способности системы наблюдения и обеспечения скрытности её работы в цифровую систему оптического наблюдения, содержащую приемную оптическую систему, оптоэлектронный приёмник в виде матрицы чувствительных элементов, аналого-цифровой преобразователь и запоминающее устройство регистрации формируемого изображения, предлагается ввести блок перестраиваемых оптических фильтров, установленный на

входе приемной оптической системы [3, 4]. Оптоэлектронный приёмник выполнен в виде блока приёмников ультрафиолетового спектрального диапазона, выходы которых соединены с входами многоканального аналого-цифрового преобразователя. Формирование изображения осуществляется в нескольких узких спектральных диапазонах УФ-излучения, соответствующих фраунгоферовым линиям поглощения.

Несущие частоты излучения лазера подсвета зондируемой поверхности согласованы по электромагнитному спектру с фраунгоферовыми линиями поглощения в ультрафиолетовом диапазоне оптического излучения. ПОИ обеспечивает приём отраженных информационных сигналов на нескольких несущих частотах лазерного источника ультрафиолетового излучения в нескольких спектральных

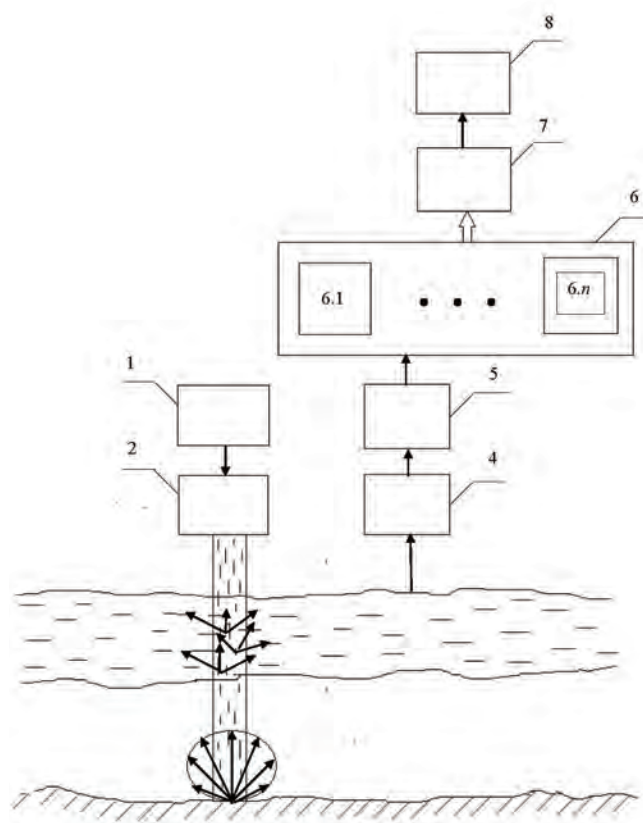


Рис. 2. Функциональная схема цифровой лазерной системы наблюдения: 1 – блок лазеров подсвета; 2 – формирующая оптика; 3 – слой атмосферы между системой наблюдения и зондируемой поверхностью; 4 – блок оптических фильтров; 5 – приемная оптическая система; 6 – приемник оптического излучения в виде блока приёмников 6.1...6.n ультрафиолетового излучения; 7 – аналого-цифровой преобразователь; 8 – процессор

диапазонах, соответствующих фраунгоферовым линиям поглощения.

На рис. 2 представлена функциональная схема цифровой лазерной системы наблюдения. Блок лазеров подсвета сканирует наблюдаемую поверхность на нескольких длинах волн УФ-излучения. Блок оптических фильтров 4 цифрового оптического приемника выполнен в виде набора узкополосных интерференционных светофильтров, согласованных по спектру со спектральными диапазонами работы приемников УФ-излучения с возможностью плавной перестройки полосы пропускания и установлен на входе приемной оптической системы 5, приемник оптического излучения 6 выполнен в виде блока приёмников 6.1, ..., 6.n ультрафиолетового излучения, воспринимающих отраженное от наблюдаемой поверхности в узких спектральных диапазонах, соответствующих длинам волн лазерного подсвета. Их выходы соединены с входами многоканального аналого-цифрового преобразователя 7, с выходов которого сигналы изображений поступают в процессор 8 для совместной обработки и формирования синтезированного (совмещенного) изображения.

В цифровой лазерной системе наблюдения предусмотрено формирование изображений в нескольких узких спектральных диапазонах УФ-излучения, которые совпадают со спектральными диапазонами, соответствующими фраунгоферовым линиям поглощения. Это позволяет, с одной стороны, избавиться от влияния фонового (фотонного) шума солнечного излучения на фраунгоферовых линиях, то есть существенно улучшить помехозащищённость системы наблюдения, а, с другой стороны, ещё больше увеличить отношение сигнал/шум, так как при формировании изображения в n спектральных диапазонах полезные сигналы суммируются линейно, а аддитивные шумы в смеси с полезным сигналом – среднеквадратично, в результате чего отношение сигнал/шум на выходе оптоэлектронного приёмника возрастает в корень квадратный из n , аналогично описанному в работе [4] применительно к системе оптической связи.

Рассмотрим систему уравнений, представляющих собой выходные сигналы u_1, u_2, \dots, u_n приёмников УФ-излучения, выраженные суммой полезных сигналов S_1, S_2, \dots, S_n и шумов N_1, N_2, \dots, N_n :

$$\begin{aligned} u_1 &= S_1 + N_1, \\ u_2 &= S_2 + N_2, \\ &\dots \end{aligned}$$

$$u_n = S_n + N_n. \quad (5)$$

В результате линейного суммирования сигналов и среднеквадратичного суммирования шумов на выходе приёмника отношение сигнал/шум S/N будет равно:

$$\begin{aligned} S/N &= (S_1 + S_2 + \dots + S_n) / (N_1^2 + N_2^2 + \dots + N_n^2)^{0.5} = \\ &= nS_1 / (nN_1^2)^{0.5}, \end{aligned}$$

$$S/N = n^{0.5} (S_1 / N_1) \quad (6)$$

Из выражения (6) следует, что отношение сигнал/шум в принятом информационном сигнале возрастает в $n^{0.5}$ раз. Так, например, при использовании 9 спектральных диапазонов для формирования изображения постилающей поверхности отношение сигнал/шум в формируемом изображении возрастёт в 3 раза, при использовании 16 диапазонов – в 4 раза.

ВЫВОДЫ

1. Использование для формирования изображения узких спектральных диапазонов, соответствующих фраунгоферовым линиям поглощения, позволяет улучшить помехозащищённость и увеличить отношение сигнал/шум в формируемом изображении в УФ-диапазоне оптического излучения.

2. Разработана методика оценки предельной высоты ДЗЗ, пригодная для расчётов с использованием лазерных средств, работающих в любых оптических спектральных диапазонах на вертикальных трассах зондирования. Методика может быть использована для оценки высот ДЗЗ при изменении параметров лазерных систем (передающей и приёмной части, мощности оптического излучения) и с учетом параметров реальной атмосферы.

3. Расчётным путём показано, что использование в УФ-диапазоне длин волн, соответствующих фраунгоферовым линиям поглощения, позволяет существенно увеличить высоту ведения ДЗЗ (не менее чем в 1.3 раза) по сравнению с близкими значениями длин волн, попадающими в «микроокна прозрачности» атмосферы, за счёт снижения уровня фонового излучения, попадающего в оптический приёмник лазерной системы наблюдения.

4. Ввиду близости сравниваемых длин волн лазерного излучения атмосферные условия, параметры перестраиваемого лазера, а также условия ведения ДЗЗ не оказывают существенного влияния.

5. Целесообразно проведение экспериментальных исследований по оценке возможности использования оптических диапазонов лазерного излучения в диапазонах ФЛП с целью подтверждения результатов выполненных расчётов для различных подстилающих поверхностей и состояний атмосферы.

6. Благодаря применению систем ДЗЗ в нескольких узких спектральных диапазонах УФ-излучения, соответствующих длинам волн фраунгоферовых линий поглощения, может быть достигнуто максимально возможное значение отношения сигнал/фотонный шум, увеличенного в корень квадратный из числа используемых спектральных каналов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Актуальные вопросы исследований в авионике: теория, обслуживание, разработки: моногра-

фия / Под ред. В.Н. Букова. – Воронеж: Изд.: полиграф. центр «Научная книга», 2020, 456 с.

2. Городничев В.А., Пашенина О.Е., Белов М.Л. и др. Оценка дальности обнаружения систем лазерной локации УФ диапазона / Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2014, №11, с. 482–496.

3. Пат. РФ №2744941, МПК10 Н04В 7/00. Система оптической связи / Ивановский В.С., Покотило С.А., Хабибулин Н.Ф. и др.). – Заявка на изобретение №2020101994/07(002905), заявл. 17.01.2020, опубл. 17.03.2021. Бюл. №8.

4. Покотило С.А., Хабибулин Н.Ф., Снегирев А.Л. Оценка преимуществ закрытой оптической связи на фраунгоферовых линиях поглощения // Телекоммуникации. – 2021, №3, с. 2–10.