

К. т. н. Ф. Г. АГАЕВ, А. Т. МЕХТИЕВ

Азербайджан, г. Баку, Азербайджанское национальное аэрокосмическое агентство

Дата поступления в редакцию
06.07 2000 г.
Оппонент к. т. н. Э. М. АЛЕСКЕРОВ

РАСЧЕТ ЛАЗЕРНОЛОКАЦИОННОЙ АППАРАТУРЫ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗАГРЯЗНЕНИЙ ВОДНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Показана возможность применения лазерной локации для контроля загрязнений водной среды и проведен расчет ее узлов.

Решение проблем охраны окружающей среды и рационального использования природных ресурсов во многом зависит от разработки и внедрения технических средств контроля экологических параметров.

Изучение загрязнений окружающей среды посредством оптической аппаратуры дистанционного зондирования, установленной на борту летательных аппаратов или с ИСЗ, является одним из интенсивно развивающихся направлений. По сравнению с традиционными контактными методами получения информации дистанционное зондирование обеспечивает широкие возможности оперативного сбора данных с высоким пространственным, спектральным и временным разрешением, а также с высокой скоростью передачи информации в центры обработки.

Создание систем с высокой скоростью передачи информации радиотехническими средствами [1] представляется весьма проблематичной задачей. Решение ее упрощается при переходе в оптический диапазон длин волн. Помимо этого оптическая сеть обладает нечувствительностью к ионизации атмосферы, повышенной помехозащищенностью и высокой направленностью излучения $\gamma = \lambda/D$, где γ — угол расходимости луча, λ — длина волны, D — диаметр антенны.

Действительно, для круговых антенн диаметром 3 м в СВЧ-системах 3-сантиметрового диапазона ($\lambda=3$ см) угол расходимости луча составляет 10 мрад, что в СВЧ-диапазоне считается достаточно малым. В оптическом же диапазоне при $\lambda=0,5$ мкм диаметр приемной антенны составляет 10 см, теоретическое значение угла расходимости $\gamma_a=5$ мкрад, и для обеспечения одинаковых уровней принимаемой мощности достаточен передатчик с мощностью излучения на 66 дБ меньше СВЧ-передатчика [2].

Для дистанционного исследования в оптическом диапазоне успешно применяются лидары, представляющие

собой сочетание согласованных по длине волны лазера и фотоприемника.

Нами разработан лидар для контроля химических загрязнений водной поверхности, в котором в качестве излучателя используется работающий в импульсном режиме He—Ne-лазер ЛГИ-102 с мощностью излучения 3 мВт.

В эксперименте лазер устанавливался на плоском основании на расстоянии 1 м от водной поверхности. На пути распространения лазерного пучка располагалась призма, направляющая излучение под углом 45° к водной поверхности. Для регистрации отраженного излучения был применен разработанный кремниевый интегральный фотопреобразователь (ИФП) с линейным выходом, изготовленный в гибридно-пленочном исполнении с чувствительным элементом на основе пленки поликристаллического кремния [3, 4] и бескорпусным операционным усилителем 740УД4. Минимальный уровень мощности ИФП в диапазоне 0,5...1,1 мкм составлял 10 Вт/см, а зависимость выходного напряжения от освещения при коэффициенте усиления $2 \cdot 10^3$ оставалась линейной вплоть до значений $6 \cdot 10^3$ лк с чувствительностью не менее 10 мВ/лк. Сигнал с выхода ИФП поступал на вход устройства обработки, где усиливался и регистрировался анализатором быстро протекающих процессов, состоящим из осциллографа, милливольтметра и индикаторного устройства (рис. 1).

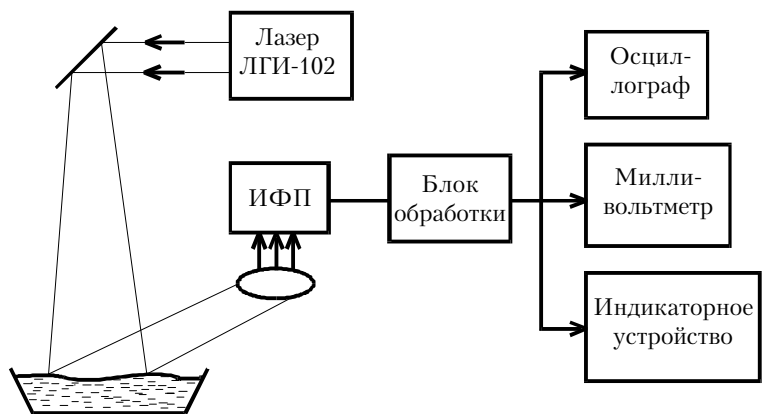


Рис. 1. Лидар на основе ЛГИ-102

Испытания показали принципиальную возможность использования лидара для идентификации загрязнений водной поверхности.

Присутствие на водной поверхности пленки нефтепродуктов увеличивает отраженный сигнал по двум физическим причинам. Во-первых, пленка нефти увеличивает отражательную способность водной поверхности. Во-вторых, нефтяные загрязнения успокаивают волнение и тем самым уменьшают шероховатость в 2–4 раза.

Результаты количественной оценки влияния волнения на величину отраженного сигнала лидара, приведены в **табл. 1** (здесь θ — угловая ширина луча, плоский угол; v — скорость ветра).

Таблица 1

Коэффициенты ослабления отраженного от водной поверхности излучения волнением ($T_{волн}$)

θ , мрад	$v_{ветр}=5$ м/с		$v_{ветр}=10$ м/с	
	Отсутствие пленки	Наличие пленки	Отсутствие пленки	Наличие пленки
3	0,11	0,34	0,05	0,16
6	0,45	1,36	0,23	0,67
52	33,6	98,6	17	50,2
100	117,5	315,3	60,5	171,3

Данные таблицы свидетельствуют о том, что волнение моря приводит к заметному уменьшению отраженного сигнала. С другой стороны, за счет сглаживания волнения сигнал, отраженный от покрытой пленкой взволнованной водной поверхности, примерно в 3 раза превосходит сигнал, отраженный от чистой воды.

Полученные экспериментальные результаты позволили произвести расчет и формулирование требований к узлам аппаратуры дистанционного зондирования нефтяных загрязнений водных бассейнов.

За исходные данные движущегося аппарата была взята высота полета 9 км и скорость 1–2 м/с, что соответствует аэростату, дирижаблю или зонду. Бортовой передатчик работает на газовом лазере на парах меди с длиной волны 0,5 мкм и мощностью излучения в импульсном режиме 30 Вт при угле расхождения 10 мрад. Коэффициент пропускания приемной оптики оценивался в 0,7.

Эффективный диаметр приемной антенны 20 см, угол зрения 1 мрад. Считалось, что в процессе измерения скорость ветра может меняться в пределах 0–5 м/с. Температура на уровне моря принималась равной 25°C при относительной влажности 60%, метеорологическая дальность видимости — 10 км, а облачность — нулю баллов.

Для количественной оценки поглощения излучения определим толщину осадженного слоя воды в атмосфере.

При распространении излучения на трассе длиной L в *приземном слое* толщина осадженного слоя воды в атмосфере (χ_v) равна $X L$, где X — удельная толщина осадженного слоя водяного пара. Величина χ_v может быть рассчитана по данным о температуре и влажности с помощью номограмм, представленных **на рис. 2** [1, с. 160]. При указанных выше температуре и влажности удельная толщина осадженного слоя водяного пара $X(0)$ составляет 13,5 мм/км. В случае распространения оптического излучения в стандартной атмосфере по наклонной траектории под зенитным расстоянием ψ при перепаде высот H эффективное значение толщины, приведенное по поглощающей способности к приземному слою, равно

$$\chi_{эфф} = \chi(0) \frac{1 - \exp(-0,5145H)}{0,5145 \cos \psi} \quad (1)$$

В случае распространения оптического излучения в стандартной атмосфере при вертикальном зондировании *водной поверхности* под зенитным расстоянием $\psi=0$ вычисленное по формуле (1) значение $\chi_{эфф}$ составило 26 мм/км.

Значение толщины осадженного слоя является исходным для определения коэффициента пропускания атмосферы $K_{п}$ с учетом эффекта поглощения. На рис. 2 показаны номограммы определения толщины слоя осадженной воды при различных значениях абсолютной влажности. Здесь с левой стороны показана относительная влажность в процентах, а с правой стороны дана удельная толщина слоя осадженной воды в мм/км.

Данные **табл. 2** [1, с. 161] позволяют рассчитать коэффициенты пропускания атмосферы при поглощении излучения в диапазоне длин волн 0,3–1,5 мкм. Экстраполируя данные табл. 2, находим, что коэффициент спектрального пропускания атмосферы за счет поглощения ($T_{п}$) составляет 0,78.

Для длины трассы $L=10$ км при средней видимости значение эффективной толщины атмосферы составляет 2,875, а коэффициент пропускания за счет рассеяния $T_{р}=0,058$. По формуле [1, с. 161]

$$T_{атм}(\lambda) = T_{п}(\lambda) T_{р}(\lambda), \quad (2)$$

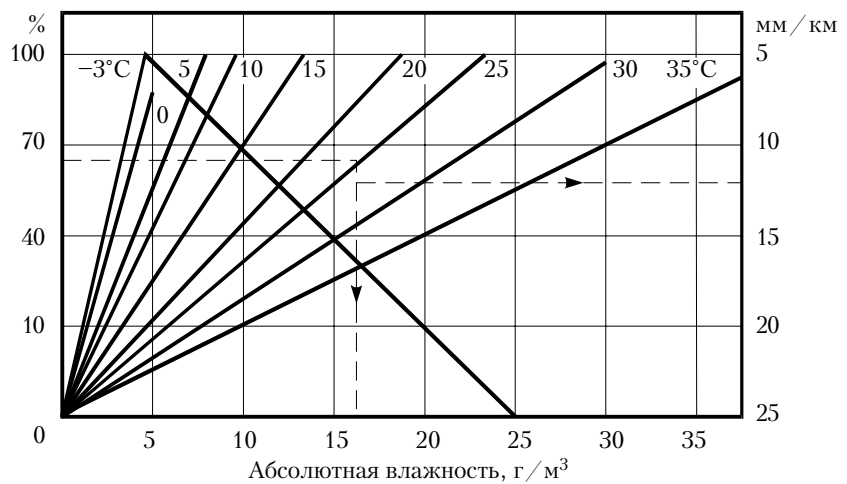


Рис. 2. Номограммы определения толщины слоя осадженной воды

Таблица 2
Коэффициенты спектрального пропускания атмосферы

$\lambda, \text{ мкм}$	Толщина осажденного слоя водяного пара на уровне моря, $\chi_v, \text{ мм}$							
	0,1	0,5	5	10	20	50	100	200
0,3	0,98	0,95	0,86	0,80	0,72	0,57	0,43	0,26
0,4	0,98	0,95	0,86	0,80	0,72	0,57	0,43	0,26
0,5	0,98	0,96	0,90	0,86	0,80	0,69	0,58	0,43
0,6	0,99	0,97	0,93	0,90	0,86	0,78	0,69	0,57
0,7	0,99	0,98	0,94	0,91	0,87	0,80	0,72	0,61
1,0	0,99	0,98	0,93	0,90	0,86	0,78	0,69	0,57
1,2	0,97	0,93	0,79	0,70	0,59	0,40	0,23	0,09
1,3	0,72	0,43	0,01	0	0	0	0	0
1,4	0,93	0,84	0,53	0,38	0,21	0,06	0,005	0
1,5	0,99	0,99	0,97	0,96	0,94	0,91	0,87	0,82

учитывающей эффекты поглощения и рассеяния, находим коэффициент пропускания атмосферы: $T_{\text{атм}}=0,78 \cdot 0,058=0,045$, т. е. лишь 4,5% излученной энергии достигает плоскости приема.

Усиление антенны G определяется телесным углом Ω , в пределах которого излучается максимальная часть мощности передатчика: $G=4\pi/\Omega$. Телесный угол расходимости луча связан с угловой шириной луча θ соотношением

$$\Omega=2\pi(1-\cos\theta/2). \quad (3)$$

Учитывая узкую диаграмму направленности передатчика, равную 10 мрад, или 30', находим $\Omega=\pi\theta^2/4$, откуда усиление $G=16/\theta^2=16 \cdot 10^4$ или 52 дБ.

За счет ветра появляется волнение на водной поверхности, характеризуемое при скорости 5 м/с параметром шероховатости $a_\Delta^2=0,02$. При этом коэффициент, учитывающий ослабление отраженного излучения волнением, определенный по формуле

$$T_{\text{волн}}=1-\exp(-\theta^2/4a_\Delta^2), \quad (4)$$

равен $T_{\text{волн}}=1,25 \cdot 10^{-3}$. Таким образом, из-за волнения величина отраженной энергии уменьшается примерно на три порядка по сравнению с энергией, отраженной от спокойной воды.

Эффективная площадь рассеяния (ЭПР) для гладкой поверхности, характеризуемой зеркальным отражением, определяется из формулы [1, с. 54]

$$P_{\text{пр}}=\text{ЭПР} P_{\text{и}} G K_{\text{опт}} T_{\text{атм}}^2 T_{\text{в}} S_{\text{а}}/16\pi^2 L^4, \quad (5)$$

где $P_{\text{пр}}$ — принимаемая мощность излучения;

$P_{\text{и}}$ — излучаемая мощность;

G — коэффициент усиления антенны;

$K_{\text{опт}}$ — коэффициент затухания излучения в приемной оптике;

$T_{\text{атм}}$ — коэффициент пропускания атмосферы;

$T_{\text{в}}$ — коэффициент ослабления волнения моря;

$S_{\text{а}}$ — площадь приемной антенны.

Квадрат при коэффициенте $T_{\text{атм}}$ предполагает равенство спектрального пропускания оптического излучения для прямого и обратного импульсов. Эффективная площадь рассеяния (ЭПР) равна $4\pi L^2=1100 \text{ км}^2$. Определив площадь приемной антенны $S_{\text{а}}=\pi D^2/4=0,03 \text{ м}^2$, по формуле (5) находим принимаемую мощность излучения $P_{\text{пр}}=1,6 \cdot 10^{-9} \text{ Вт}$ при скорости ветра 5 м/с. В безветренную погоду принимаемая мощность возрастает на 30 дБ, составив 1,26 мкВт.

Полученная методика проведения расчетов регистрируемой мощности позволила сформулировать требования к параметрам приемной антенны, к выбору фотоприемника и к узлам обработки электрического сигнала.

Таким образом, показана возможность применения методов лазерной локации для контроля параметров водной среды и ее загрязнений. Работоспособность разработанного образца лазерного обнаружителя загрязнений водных бассейнов подтверждена лабораторными испытаниями.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Агаев Ф. Г. Дистанционный контроль параметров водной среды локационными методами. — Баку : ЭЛМ, 2000.
2. Томиясу Х. Дистанционное исследование Земли в СВЧ-диапазонах // ТИИЭР. — 1974. — №1. — С. 107 — 115.
3. Касимов Ф. Д., Агаев Ф. Г. Микроэлектронные фотопреобразователи на основе пленок поликристаллического кремния // Fizika, АН Азербайджана. — 1988. — Т. 4, №2. — С. 24 — 26.
4. Касимов Ф. Д., Агаев Ф. Г., Джавадов Н. Г. Интегральные фотопреобразователи на основе локально выращенных пленок моно- и поликристаллического кремния // Тр. 5-й Всерос. науч.-техн. конф. «Актуальные проблемы твердотельной электроники и микроэлектроники». — Россия, Таганрог — Дивноморское, сентябрь 1998. — С. 140.