

Г.А. Калошин, В.С. Козлов, М.В. Панченко, В.В. Полькин

## ЛОКАЦИОННЫЙ ИЗМЕРИТЕЛЬ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОЙ ДАЛЬНОСТИ ВИДИМОСТИ В СОСТАВЕ ЛАЗЕРНОГО МАЯКА. Ч. I. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Приводятся результаты расчетов величины и динамического диапазона рассеянных световых потоков, регистрируемых в области локационных углов в зависимости от выбора оптико-геометрической схемы локационного измерителя видимости, работающего на основе регистрации обратного рассеяния лазерного излучения маяка.

Показана возможность реализации локационного измерителя видимости в составе однопозиционной конструкции лазерного маяка.

### Введение

Использование лазеров в качестве источников узконаправленных световых пучков в маяках значительно продвигает предельные дальности обнаружения  $L_{пр}$  в область больших оптических толщин в плотных атмосферных дымках, когда традиционные самосветящиеся навигационные знаки уже не видны [1]. С одной стороны, это достигается благодаря высокой направленности лазерных пучков и монохроматичности, а с другой – высокой спектральной яркости и относительно высокой выходной мощности используемых лазеров.

Тем не менее достигнутые  $L_{пр}$  для многих случаев практики судовождения, особенно для условий низкой прозрачности атмосферы, являются недостаточными [2] и задача увеличения  $L_{пр}$  еще долгое время будет актуальной.

Дальнейшее увеличение  $L_{пр}$  лазерного маяка связано в первую очередь с оптимизацией светового режима и повышением энергетического потенциала маяка. Однако прямое повышение выходной мощности лазеров ограничено безопасностью, характеризуемой предельно допустимым уровнем энергии  $Q$ , которая является функцией параметров светового сигнала  $E$  и яркости фона адаптации зрения  $B_{\phi}$ .

В этой связи вполне естественна идея лазерного маяка, автоматически изменяющего энергию световых сигналов в зависимости от изменения метеорологической дальности видимости  $S_m$ ,  $B_{\phi}$  и дистанции  $L$ .

Оставляя за пределами данной статьи круг вопросов, связанных с обсуждением зависимости  $Q = f(B_{\phi}, E)$ , рассмотрим возможность реализации встроенного в лазерный маяк локационного датчика видимости, работающего на основе регистрации обратного рассеяния лазерного излучения маяка. В этом варианте в отличие от базисного метода измерения  $S_m$  достигается однопозиционность конструкции, т.е. совмещение в одном пункте приемника и передатчика световых сигналов, что является безусловным преимуществом при привязке маяка на местности.

В рамках однопараметрической модели оптических характеристик дымок [3] для оценки коэффициента рассеяния (метеорологической дальности видимости) возможно использование регистрации сигнала под любым из углов рассеяния.

Наибольшую точность оценки объемного коэффициента рассеяния нефелометрическим способом дают измерения под углом  $45^\circ$  [3]. Но в этом случае, при сохранении однопозиционности конструкции, приходится работать с малыми рассеивающими объемами, к тому же расположенными практически в зоне технического обслуживания маяка, где существует дополнительная аэрозольная нагрузка.

Измерения вблизи углов, близких к  $180^\circ$ , дают меньшую точность оценки объемного коэффициента [3], но позволяют при компоновке схемы отнести рассеивающий объем на бо-

льшее расстояние (по сравнению с  $45^\circ$ ) от технической зоны маяка в направлении передачи навигационной информации и значительно лучше проинтегрировать сигнал по пространству.

Обеспечение достаточного энергетического потенциала локационного измерителя видимости в реальных условиях связано с необходимостью корректного выбора оптико-геометрической схемы измерителя. Для решения этой задачи целесообразно на основе расчетов исследовать динамический диапазон и особенности изменчивости величин рассеянных световых потоков, регистрируемых в области локационных углов в зависимости от параметров измерителя: апертуры источника и расходимости пучка, апертуры приемника и его угла зрения, взаимного расположения источника и приемника (базы) и угла схождения оптических осей систем, определяющих в совокупности величину и положение рассеивающего объема.

Расчеты выполнены для оптико-микрофизической модели атмосферной дымки прибрежного района [3], являющейся характерным типом атмосферно-оптических замутнений. При этом предполагаются следующие условия: однородность помутнения вдоль трассы лазерного пучка, что в достаточной степени выполняется для прибрежных дымок и горизонтальных трасс, характерных для большинства геометрий установки маяков; отсутствие поглощения лазерного излучения на рабочей длине волны маяка  $\lambda = 0,51$  мкм и незначительность вклада многократного рассеяния света (приближение однократного рассеяния).

За основу при проведении расчетов нами взята моностатическая схема локации обратного рассеяния [4] (рис. 1), где  $d_1$  – апертура источника,  $2\gamma_1$  – расходимость лазерного пучка источника;  $d_2$  – апертура приемника;  $2\gamma_2$  – угол зрения приемника. Причем  $d_1$  и  $2\gamma_1$  являются заданными конструктивом маяка, а  $d_2$  и  $2\gamma_2$  в расчетах варьируются. Взаимное расположение передающей и приемной оптических систем определяется базой между осями этих систем  $B$  и углом схождения оптических осей систем  $\phi$ .

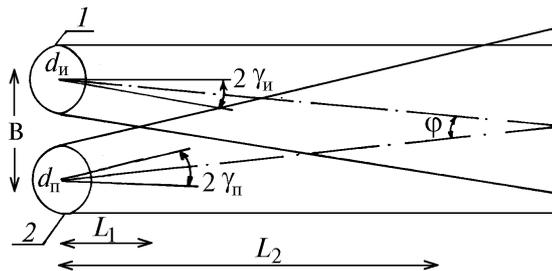


Рис. 1. Геометрическая схема локационного измерителя видимости. 1 – апертура источника, 2 – апертура приемника

Как показано в [5], световой поток излучения, регистрируемый приемником от элементарного рассеивающего объема  $dV_p$ , определяется как

$$d\Phi_p(\theta) = dJ_p(\theta) \omega_n, \quad (1)$$

где  $dJ_p(\theta)$  – интенсивность (сила света) рассеянного излучения под углом рассеяния  $\theta$ ;  $\omega_n$  – телесный угол, в котором принимается рассеянное излучение. Для малых углов зрения приемника  $2\gamma_n \approx 1^\circ$  справедливо выражение  $\omega_n = \pi \sin^2 \gamma_n$ . В свою очередь интенсивность рассеянного излучения можно представить в виде

$$dJ_p(\theta) = \mu_\theta E dV_p(\theta) e^{-2\tau}, \quad (2)$$

где  $\mu_\theta$  – коэффициент направленного светорассеяния под углом  $\theta$ , в рассматриваемом случае – коэффициент обратного светорассеяния  $\beta_\pi$ ;  $E$  – освещенность элементарного рабочего рассеивающего объема  $dV_p$ ;  $\tau$  – оптическая толщина рассеивающей среды от приемопередатчика до  $V_p$ . Величина освещенности  $E$  определяется мощностью источника излучения  $P_0$ , расстоянием до рассеивающего объема  $L$  и телесным углом расходимости излучения источника  $\omega_n$ :

$$E = P_0 / L^2 \omega_n. \quad (3)$$

Учитывая также, что  $\omega_n = \pi \sin^2 \gamma_n$  и  $\tau = \varepsilon L = 3,9L/S_m$ , где  $\varepsilon$  – коэффициент ослабления атмосферы, уравнение (1) можно привести к виду

$$d\Phi_p(\pi) = \frac{\beta\pi}{L^2} P_0 \frac{\sin^2 \gamma_n}{\sin^2 \gamma_n} e^{-7,8/S_m} dV_p(\pi). \quad (4)$$

Полный световой поток, регистрируемый приемником, равен сумме дифференциальных составляющих потока от всех элементарных рассеивающих объемов  $dV_p(L)$ , входящих в полный рассеивающий объем аэрозоля  $V_p$ :

$$\Phi_p(\pi) = \int_{V_p} d\Phi_p(\pi) = \int_L d\Phi_p(L, \pi). \quad (5)$$

Уравнение (4) является дифференциальной формой записи уравнения локации и используется нами для выполнения численных расчетов аддитивных частей светового потока, поступающего в приемник с отдельных участков зондируемой трассы. В свою очередь уравнение (5) на основе суммирования отдельных сигналов позволяло определить интегральный оптический сигнал.

Далее расчет выполнялся в следующем порядке:

1) задавались оптико-геометрические параметры локационной схемы измерителя прозрачности и определялась его геометрическая функция (пространственные границы рассеивающего объема, необходимые для расчетов по выражениям (4) и (5));

2) разрабатывалась процедура корректного расчета элементарных рассеивающих объемов  $dV_p(L)$  вдоль трассы зондирования;

3) выполнялся расчет с необходимой пространственной дискретностью по  $L$  дифференциальных оптических сигналов с участков трассы;

4) осуществлялась оценка рассчитанного интегрального энергетического сигнала измерителя прозрачности и рассматривалась возможность его регистрации реальным фотоприемником.

Далее были заданы оптико-геометрические параметры приемно-передающей системы. Параметры источника: длина волны излучения  $\lambda = 0,51$  мкм, выходная мощность  $P_0 = 0,045$  Вт;  $2\gamma_n = 5'$  и  $d_n = 0,005$  м.

Параметры приемника, используемые в расчетах, приведены в табл. 1.

Таблица 1

$d_n$	0,10 м	0,16 м
$2\gamma_n$	22'	1°
$B$	0,20 м	0,25 м
$\varphi$	0°	55'

Для выполнения расчетов по формуле (4) необходимо было также иметь дополнительную входную информацию о связи коэффициента обратного рассеяния  $\beta_\pi$  с коэффициентом ослабления атмосферы (метеорологической дальности видимости  $S_m$ ). Для этого была использована предложенная в [3] оптико-микрофизическая модель атмосферных дымок прибрежного района. Модель устанавливает в численном виде для заданной длины волны излучения зависимость коэффициента обратного рассеяния  $\beta_\pi$  от  $S_m$  в диапазоне от 5 до 50 км, которая приведена в табл. 2.

Таблица 2

Значения коэффициента обратного рассеяния  $\beta_\pi$  для  $\lambda=0,51$  мкм по модели [3]

$S_m$ , км	5	10	20	30	50
$\varepsilon$ , км <sup>-1</sup>	$8,46 \cdot 10^{-1}$	$4,23 \cdot 10^{-1}$	$2,19 \cdot 10^{-1}$	$1,52 \cdot 10^{-1}$	$9,91 \cdot 10^{-2}$
$\beta_\pi$ , км <sup>-1</sup> ·ср <sup>-1</sup>	$1,41 \cdot 10^{-1}$	$8,54 \cdot 10^{-2}$	$5,79 \cdot 10^{-2}$	$4,57 \cdot 10^{-2}$	$3,62 \cdot 10^{-2}$

Наиболее характерные результаты расчетов дифференциальных рассеянных световых потоков  $d\Phi_p(L)/dL$  приведены на рис. 2, 3, 4. Расчеты интегральных световых потоков представлены в табл. 3.

Обсуждение результатов расчетов показывает, что изменение рассеивающего объема  $V_p$  и его положения на трассе зондирования обеспечивается изменением  $2\gamma_n$  и  $\varphi$ . Изменение  $2\gamma_n$  от  $1^\circ$  до  $22'$  при  $\varphi = 0^\circ$  приводит к увеличению  $V_p$ , а граница зоны  $L_2$  сдвигается от 31,5 м до 102 м. При этом возрастает вклад зоны  $L < L_2$  в регистрируемый сигнал. Так, если при  $2\gamma_n = 1^\circ$  вклад  $L < L_2$  составляет  $\sim 10\%$  при  $S_m = 5$  км и  $\sim 5\%$  при  $S_m = 50$  км, то при  $2\gamma_n = 22'$  соответственно 25% и 15%. Более рельефно эта зависимость просматривается при изменении  $\varphi$  от 0 до  $55^\circ$  (см. рис. 4).

Таблица 3

Значения интегральных световых потоков (Вт), регистрируемые локационным измерителем прозрачности при  $P_0 = 0,045$  Вт;  $2\gamma_n = 5'$ ;  $\lambda = 0,51$  мкм;  $d_n = 0,005$  м

$S_m, \text{ км}$	Параметры		
	$d_n = 0,1 \text{ м}; B = 0,2 \text{ м}; \varphi = 0^\circ$		$d_n = 0,16 \text{ м}; B = 0,25 \text{ м}; \varphi = 55'$
	$2\gamma_n$		
	$22'$	$1^\circ$	$1^\circ$
	$L_1 = 10,2 \text{ м}; L_2 = 37,6 \text{ м}$	$L_1 = 15,6 \text{ м}; L_2 = 31,5 \text{ м}$	$L_1 = 6,6 \text{ м}; L_2 = 50 \text{ м}$
5	$8,8 \cdot 10^{-8}$	$8,7 \cdot 10^{-7}$	$6,4 \cdot 10^{-8}$
50	$2 \cdot 10^{-7}$	$1,4 \cdot 10^{-6}$	$1,7 \cdot 10^{-7}$

Таким образом, вариации геометрических параметров для заданной  $S_m$ , влияя на положение границ  $L_1$  и  $L_2$ , не меняют кардинально форму кривых  $d\Phi/dL$  (см. рис. 2–4).

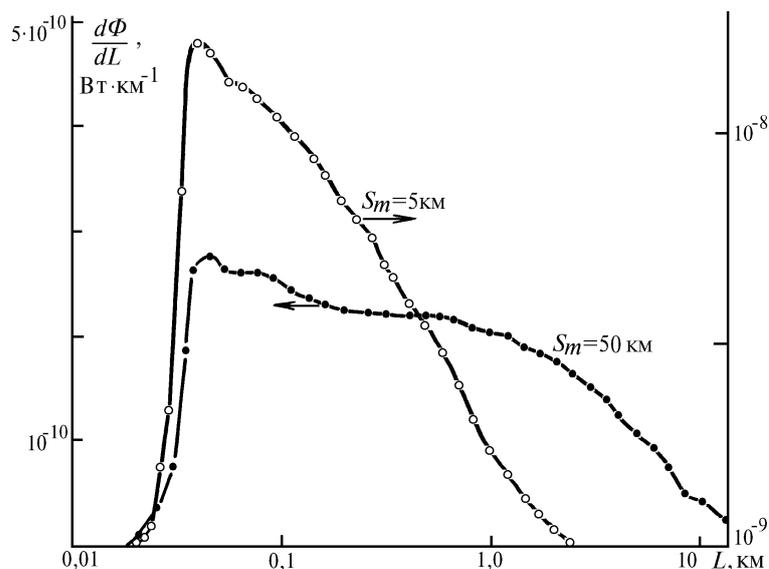


Рис. 2. Дифференциальные потоки рассеянного назад излучения. Оптико-геометрические параметры локационного измерителя видимости:  $P_0 = 4,5 \cdot 10^{-2}$  Вт;  $2\gamma_n = 5'$ ;  $d_n = 0,005$  м;  $2\gamma_n = 1^\circ$ ;  $d_n = 0,1$  м;  $B = 0,2$  м;  $\varphi = 0^\circ$

Рассмотрим, как влияют вариации  $S_m$  на полный сигнал рассеяния. Характерной особенностью кривых рис. 2–4 является то, что уменьшение видимости от 50 до 5 км приводит к резкому возрастанию уровня дифференциальных сигналов, приходящих с расстояний  $L \leq 0,9$  км. При этом также значительно сужается рабочая зона рассеивающего объема. Так, для  $S_m = 50$  км сигнал  $d\Phi/dL$  уменьшается до 10% от максимального значения на  $L = 20$  км, тогда как для  $S_m = 5$  км, такое уменьшение сигнала достигается уже при  $L \sim 3$  км. Следовательно, при уменьшении видимости в атмосфере ( $S_m = 5$  км) локационный сигнал измерителя прозрачности формируется более близкими к прибору рассеивающими объемами, а при  $S_m = 50$  км

основной вклад в полный сигнал рассеяния вносит область дистанций  $L > L_2$ . Следовательно, при хорошей видимости, когда дальность обнаружения традиционных самосветящихся навигационных знаков достаточна для требований практики судоходства, погрешность измерения  $S_m$  рассматриваемым датчиком видимости будет большой. Поэтому целесообразно при создании подобного измерителя  $S_m$  ограничиться измерением такого диапазона  $S_m$ , в котором использование лазерных маяков взамен традиционных наиболее эффективно. Такой диапазон значений  $S_m$  составляет  $2 \div 10$  км [2].

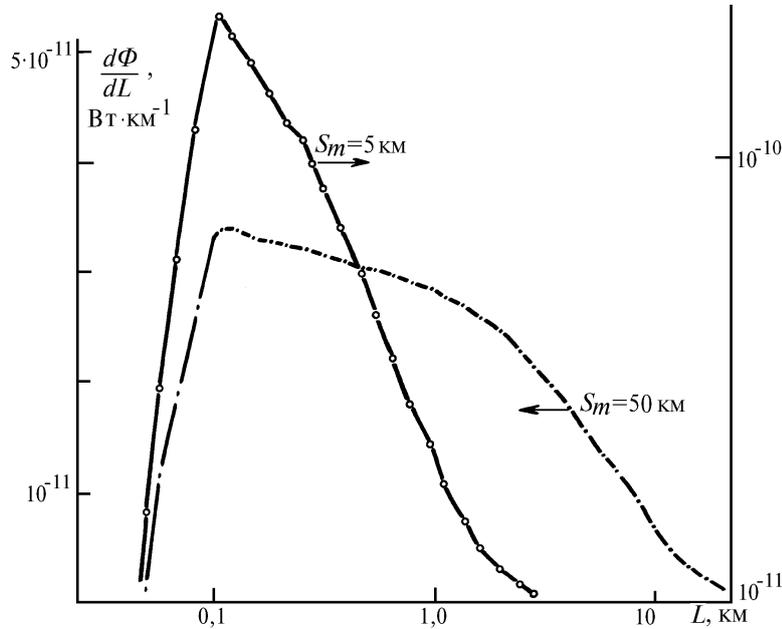


Рис. 3. Дифференциальные потоки рассеянного назад излучения. Оптико-геометрические параметры локационного измерителя видимости:  $P_0 = 4,5 \cdot 10^{-2} \text{ Вт}$ ;  $2\gamma_{\text{н}} = 5'$ ;  $d_{\text{н}} = 0,0005 \text{ м}$ ;  $2\gamma_{\text{п}} = 22'$ ;  $d_{\text{п}} = 0,1 \text{ м}$ ;  $B = 0,2 \text{ м}$ ;  $\varphi = 0^\circ$

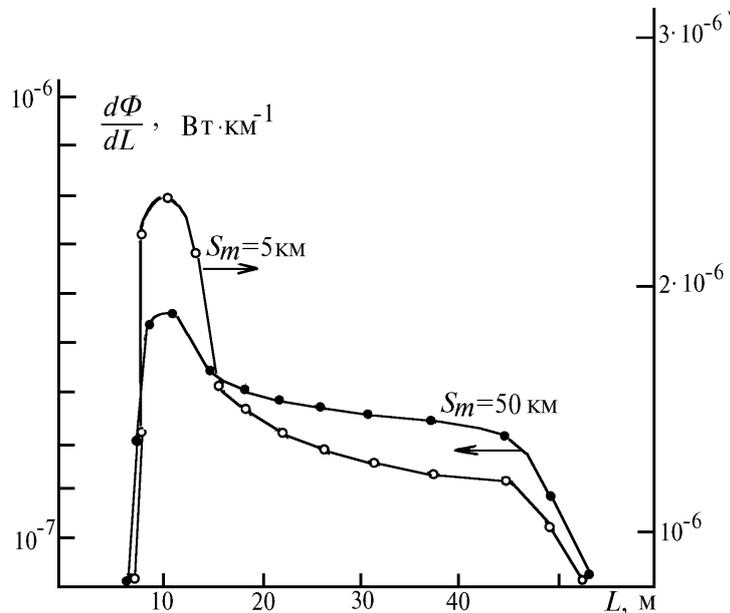


Рис. 4. Дифференциальные потоки рассеянного назад излучения. Оптико-геометрические параметры локационного измерителя видимости:  $P_0 = 4,5 \cdot 10^{-2} \text{ Вт}$ ;  $2\gamma_{\text{н}} = 5'$ ;  $d_{\text{н}} = 0,005 \text{ м}$ ;  $2\gamma_{\text{п}} = 1^\circ$ ;  $d_{\text{п}} = 0,16 \text{ м}$ ;  $B = 0,25 \text{ м}$ ;  $\varphi = 55'$

Как следует из рис. 2–4, вариациями  $2\gamma_{\text{н}}$  достигается изменение положения  $V_{\text{р}}$  и его значения. В техническом исполнении наиболее просто это сделать за счет выбора угла схождения оптических осей излучателя и приемника  $\varphi$ . Причем целесообразно иметь  $\varphi$  не равным  $0^\circ$ . В этом случае  $V_{\text{р}}$  будет располагаться достаточно близко от приемника и допущение о малости вклада многократного рассеяния, используемого при выводе выражения (2), будет вполне оправдано, следовательно, уменьшится методическая погрешность оценки  $S_m$ . Отметим, что погрешности, возникающие при <прогнозе>  $S_m$ , измеренной в месте установки маяка, на всю дистанцию  $L_{\text{пр}}$ , обусловлены в основном неоднородностью прибрежной дымки и для горизонтальных трасс в нашем случае, согласно [3] не превышают  $5 \div 10\%$ .

Таким образом, результаты расчета локационных сигналов позволили оптимизировать оптико-геометрические параметры измерителя  $S_m$ , оценить порядок величины и динамический диапазон изменения сигнала и выявить источники методических погрешностей измерения  $S_m$ .

Для рассмотренных оптико-геометрических параметров приемника ( $B = 0,25$  м;  $\varphi = 55'$ ;  $\gamma_{\text{н}} = 22'$  и  $1^\circ$ ), которые достаточно просто обеспечиваются с помощью серийно выпускаемых высококачественных объективов, регистрируемый локационный сигнал составляет ( $10^{-8}$ – $10^{-6}$ ) Вт (см. табл. 3) и может быть уверенно принят кремниевыми фотодиодами [6].

1. Л а з е р н ы е устройства для обеспечения судовождения. / Зуев В.Е., Калошин Г.А., Константинов Р.С. и др. Новосибирск: Наука, 1985. 127 с.
2. И т о г и науки и техники. Серия <Водный транспорт>. Т. 12. Навигационное оборудование морей. / Под ред. М.В. Бурханова. М.: ВИНТИ, 1985. 177 с.
3. О п т и ч е с к и е свойства прибрежных атмосферных дымок / Кабанов М.В., Панченко М.В., Пхалагов Ю.А. и др. Новосибирск: Наука, 1988. 201 с.
4. Л а з е р н о е зондирование промышленных аэрозолей / Зуев В.Е., Кауль Б.В., Самохвалов И.В. и др. Новосибирск: Наука, 1986. 186 с.
5. И в а н о в А.П. Оптика рассеивающих сред. Минск: Наука и техника, 1969. 592 с.
6. А к с е н е н к о М.Д., Б а р а н о ч н и к о в М.Л. Приемники оптического излучения. Справочник. М.: Радио и связь, 1987. 296 с.

Институт оптики атмосферы  
СО РАН, Томск

Поступила в редакцию  
23 февраля 1994 г.

G. A. Kaloshin, V. S. Kozlov, M. V. Panchenko, V. V. Pol'kin. **Meteorological Visibility Meter as a Part of Laser Beacon. 1. Theoretical Results.**

Computational results of magnitude and dynamic range of scattered light flows recorded within location angles region are presented in the paper as a function of the visibility meter's optical-geometric circuit, which operates based on recording the back scattering of a beacon laser radiation.

A possibility for the visibility meter to be realized as a part of one-positional structure of the laser beacon is also shown in the papers.