

М.М. Кугейко, Д.М. Оношко

Связь параметров рассеивающей среды и измерительной аппаратуры в бистатистическом томографическом зондировании

Белорусский государственный университет, г. Минск

Поступила в редакцию 26.03.2001 г.

Получены соотношения, связывающие параметры состояния исследуемой рассеивающей среды (метеорологическая дальность видимости), параметры схемы бистатистического зондирования (расстояния между приемниками, источниками излучения), дальность до исследуемых слоев. Установлена связь минимального пространственного разрешения с оптическими характеристиками среды и погрешностью измерительной аппаратуры. Полученные соотношения позволяют устанавливать параметры бистатистической томографической схемы зондирования для конкретных метеорологических и гидрологических ситуаций.

Оперативный контроль загрязнений окружающей среды (атмосферы, водных сред) наиболее успешно осуществляется при зондировании с борта самолета (для атмосферы) или вертолета (для водной среды). При этом предпочтительнее использовать томографические методы зондирования, поскольку они в отличие от традиционных схем дистанционного лазерного зондирования не требуют привлечения дополнительной априорной информации о функциональной взаимосвязи между оптическими характеристиками (коэффициентами обратного и общего рассеивания) и их пространственной структуре.

Однако центральным моментом предложенных схем томографического зондирования [1–3] является вычисление логарифмических производных сигналов рассеяния. Учитывая дискретный характер реальной экспериментальной информации, а также некорректность задачи численного дифференцирования регистрируемых сигналов, можно считать, что практическая реализация данных методов является неэффективной вследствие того, что малые погрешности измерительной части могут привести к большим ошибкам в определении исследуемых оптических характеристик [4].

В работе [5] рассмотрена бистатистическая схема томографического зондирования, не требующая вычисления логарифмических производных регистрируемых сигналов, устойчивая к различным дестабилизирующим факторам как в приемно-излучающих, регистрирующих блоках, так и в окружающей среде, а также к вкладам многократного рассеяния. Показано, что погрешность определения оптических характеристик (коэффициентов ослабления ϵ) определяется практически только погрешностью регистрируемых сигналов. Очевидна, однако, актуальность рассмотренных вопросов взаимосвязи параметров рассеивающей среды, характеризующих ее состояние (например, метеорологическая дальность видимости $S_m = 3,9/\epsilon$),

пространственного разрешения и параметров измерительной системы (точностные характеристики, габаритные размеры и т.п.), поскольку состояния рассеивающей окружающей среды многообразны, а размеры носителей измерительной аппаратуры ограничены.

Получим вначале для рассматриваемой бистатистической схемы зондирования [5] соотношение, связывающее пространственное разрешение L с погрешностью измерительной аппаратуры и состоянием рассеивающей среды (прозрачная атмосфера, дымка, туман, облако, водная среда и т.п.), характеризуемой метеорологической дальностью видимости S_m . Под пространственным разрешением L будем понимать длину пути зондирующего излучения внутри исследуемого объема, на которой различия в регистрируемых значениях сигналов являются достаточными, чтобы считать эти сигналы разными, т.е. не расположенными в пределах погрешности измерений. Будем считать, что абсолютная ошибка измерения сигналов обратного рассеяния Δ не может превышать половины разности регистрируемых сигналов $S(R_i)$ для двух положений зондирующего импульса ($\Delta < \Delta S/2$), где $\Delta = S(R_i) - S_{\text{ист}}$, $S_{\text{ист}}$ – истинное значение сигнала, $\Delta S = S(R_i) - S(R_{i+1})$. Это неравенство является условием максимально допустимой погрешности измерений сигналов.

Регистрируемые сигналы $S(R)$ описываются уравнением оптической локации, имеющим вид

$$S(R_i, \mathbf{r}_j, R_k) = A_i A_k \beta \phi_l(\mathbf{r}_j) T(R_i, \mathbf{r}_j) T(R_k, \mathbf{r}_j),$$

где

$$T(R_i, \mathbf{r}_j) = \exp \left\{ - \int_{R_i}^{r_j} \epsilon(\mathbf{r}) d\mathbf{r} \right\},$$

$$T(R_k, \mathbf{r}_j) = \exp \left\{ - \int_{R_k}^{r_j} \varepsilon(\mathbf{r}) d\mathbf{r} \right\};$$

A_i, A_k – соответственно аппаратурные константы источников и приемников ($i = 1, 2; k = 3, 4$); r_j – точки, из которых принимается рассеянный сигнал ($j = 1, 2, 3, 4$); $\beta\varphi_l(r_j)$ – коэффициенты рассеяния под углом φ_e в точке r_j ($l = 1, 2$). Принятие индексом l двух значений говорит о том, что в статье рассматривается частный случай симметричной схемы зондирования, для которой $\varphi_1 = \varphi_2$, поскольку этот случай отражает все закономерности связи анализируемых параметров, присущие общей схеме, и упрощает анализ.

Считая, что сигналы $S(\mathbf{R}_1, \mathbf{r}_1, \mathbf{R}_3)$ и $S(\mathbf{R}_2, \mathbf{r}_4, \mathbf{R}_4)$, приходящие на приемное устройство из точек \mathbf{r}_1 и \mathbf{r}_4 , соответствуют i -му отсчетному уровню, а сигналы $S(\mathbf{R}_1, \mathbf{r}_3, \mathbf{R}_4)$ и $S(\mathbf{R}_2, \mathbf{r}_2, \mathbf{R}_3)$, приходящие из точек \mathbf{r}_3 и \mathbf{r}_2 , – $(i + 1)$ -му уровню, разность сигналов ΔS можно представить в следующем виде:

$$\Delta S = S(\mathbf{R}_1, \mathbf{r}_1, \mathbf{R}_3) - S(\mathbf{R}_2, \mathbf{r}_2, \mathbf{R}_3). \quad (1)$$

Абсолютная ошибка измерения сигнала $\Delta = \delta S_i S(R_i)$, где δS_i – погрешность измерения сигнала $S(R_i)$, равна

$$\Delta = \delta[S(\mathbf{R}_1, \mathbf{r}_1, \mathbf{R}_3)] S(\mathbf{R}_1, \mathbf{r}_1, \mathbf{R}_3). \quad (2)$$

Подставляя (1) и (2) в неравенство $\Delta < \Delta S / 2$, запишем

$$\begin{aligned} \delta[S(\mathbf{R}_1, \mathbf{r}_1, \mathbf{R}_3)] S(\mathbf{R}_1, \mathbf{r}_1, \mathbf{R}_3) < \\ < 0,5 [S(\mathbf{R}_1, \mathbf{r}_1, \mathbf{R}_3) - S(\mathbf{R}_2, \mathbf{r}_2, \mathbf{R}_3)], \end{aligned}$$

или

$$2\delta[S(\mathbf{R}_1, \mathbf{r}_1, \mathbf{R}_3)] < 1 - \frac{S(\mathbf{R}_2, \mathbf{r}_2, \mathbf{R}_3)}{S(\mathbf{R}_1, \mathbf{r}_1, \mathbf{R}_3)}.$$

Далее, с учетом уравнения оптической локации получаем (считая $T(R_2, r_4)/T(R_1, r_1) \approx 1$, что выполняется практически во всех атмосферных ситуациях ввиду равенства $[R_2, r_4]$ и $[R_1, r_1]$):

$$2\delta[S(\mathbf{R}_1, \mathbf{r}_1, \mathbf{R}_3)] < 1 - \frac{\beta\varphi_2(\mathbf{r}_1)}{\beta\varphi_1(\mathbf{r}_1)} T(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2) T(\mathbf{r}_4, \mathbf{r}_2).$$

Для близкорасположенных отсчетных уровней, удовлетворяющих условию квазиоднородности $[\beta\varphi_1(\mathbf{r}_1) \approx \beta\varphi_2(\mathbf{r}_2)]$:

$$2\delta[S(\mathbf{R}_1, \mathbf{r}_1, \mathbf{R}_3)] < 1 - \exp[-\varepsilon|\mathbf{r}_2 - \mathbf{r}_1|] \exp[-\varepsilon|\mathbf{r}_2 - \mathbf{r}_4|]$$

или

$$\exp[-\varepsilon L/2] < 1 - 2\delta[S(\mathbf{R}_1, \mathbf{r}_1, \mathbf{R}_3)], \quad (3)$$

где

174

$$\begin{aligned} L &= |\mathbf{r}_2 - \mathbf{r}_1| + |\mathbf{r}_2 - \mathbf{r}_4| + |\mathbf{r}_3 - \mathbf{r}_4| + |\mathbf{r}_3 - \mathbf{r}_1| = \\ &= 2 [|\mathbf{r}_2 - \mathbf{r}_1| + |\mathbf{r}_2 - \mathbf{r}_4|]. \end{aligned}$$

Из (3) с учетом, что $S_m = 3,9/\varepsilon$, окончательно получаем

$$L_{\min} > - \frac{2 \ln(1 - 2\delta S)}{3,9} S_m. \quad (4)$$

Полученное выражение отображает зависимость между минимальным пространственным разрешением L , погрешностью измерения сигналов δS и состоянием рассеивающей среды S_m . Таким образом, зная возможности измерительной аппаратуры, можно установить минимальное пространственное разрешение для различных состояний исследуемой среды.

При выводе выражения (4) предполагалось, что абсолютная ошибка измерения сигнала Δ не должна превышать половины разности сигналов ΔS , регистрируемых из двух соседних точек среды, т.е. погрешность измерения сигналов обратного рассеяния не должна превышать 50%. В противном случае может достигаться физически абсурдный результат (например, определяемая прозрачность численно может превышать единицу, коэффициент ослабления может принимать отрицательные значения). Данное соотношение позволяет выбрать минимальную длину пути L , необходимую для прохождения зондирующего излучения внутри исследуемого объема, при которой величина ослабления сигнала будет превышать величину ошибки измерения. При $\delta S > 50\%$ алгоритм (4) не имеет смысла применять, так как при данных погрешностях он неработоспособен (данное условие изначально закладывалось в критерий неработоспособности (4)).

Анализ результатов изучения спектральной прозрачности и матриц рассеяния в приземном слое атмосферы позволяет выделить несколько качественно различных типов оптического состояния атмосферы: облака и туманы $S_m < 1$ км, туманная дымка $1 \text{ км} \leq S_m \leq 3 \text{ км}$, дымка $S_m > 3 \text{ км}$; значение коэффициента ослабления ε для поверхностных вод открытого океана составляет $0,1 \div 0,15 \text{ м}^{-1}$, для глубинных вод – $0,05 \div 0,1 \text{ м}^{-1}$, а для прибрежных вод до $3,5 \text{ м}^{-1}$ [6].

Результаты расчета минимального пространственного разрешения для различных рассеивающих сред, приведены на рис. 1 и 2.

Видно, что L сильно зависит от точности измерительной аппаратуры. Если для выбросов из труб промышленных предприятий, туманов при погрешностях измерительной аппаратуры ($\delta S = 2\%$) достигается разрешение в метрах, то для дымок необходимо разрешение в десятки метров (см. рис. 1).

Для водных сред, как следует из анализа рис. 2, минимальное пространственное разрешение может достигать единиц сантиметров.

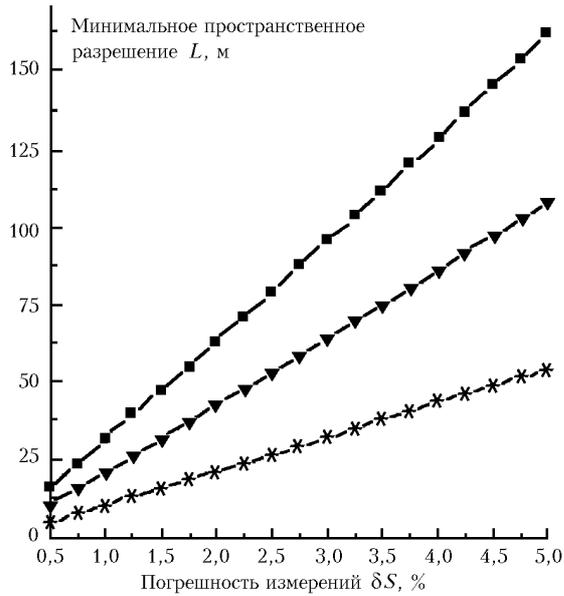


Рис. 1. Результаты расчета минимального пространственного разрешения для дымки

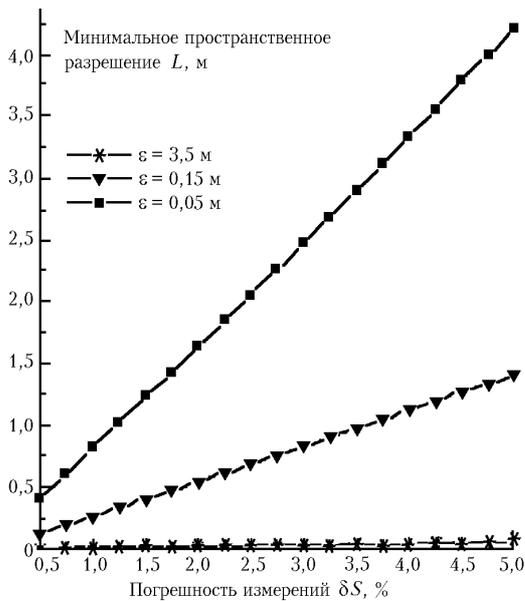


Рис. 2. Результаты расчета минимального пространственного разрешения для водной среды

Получим теперь выражение, связывающее дальность до исследуемого объекта с габаритными размерами измерительной системы, погрешностью измерения сигналов и состоянием рассеивающей среды.

Будем исходить из геометрии схемы зондирования [5] и из выражения для

$$L = |\mathbf{r}_2 - \mathbf{r}_1| + |\mathbf{r}_2 - \mathbf{r}_4| + |\mathbf{r}_3 - \mathbf{r}_4| + |\mathbf{r}_3 - \mathbf{r}_1|.$$

Рассмотрим треугольник с вершинами в точках $\mathbf{R}_1, \mathbf{r}_1, \mathbf{R}_3$:

$$\operatorname{tg} \alpha = |\mathbf{r}_1 - \mathbf{R}_3| / |\mathbf{R}_3 - \mathbf{R}_1| = d / \Delta_1, \quad (5)$$

и треугольник с вершинами в точках $\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_3, \mathbf{r}_4$:

$$\operatorname{tg} \alpha = |\mathbf{r}_3 - \mathbf{r}_4| / |\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_4| = |\mathbf{r}_3 - \mathbf{r}_4| / \Delta_2; \\ |\mathbf{r}_2 - \mathbf{r}_4| = |\mathbf{r}_3 - \mathbf{r}_1| = \frac{\Delta_2}{\cos \alpha}. \quad (6)$$

Учитывая (5) и (6), легко получить

$$|\mathbf{r}_2 - \mathbf{r}_1| = |\mathbf{r}_3 - \mathbf{r}_4| = d \frac{\Delta_2}{\Delta_1}. \quad (7)$$

Исходя из (6) и (7), выражение для L запишется следующим образом:

$$L = 2 \left\{ d \frac{\Delta_2}{\Delta_1} + \frac{\Delta_2}{\cos \alpha} \right\}.$$

С учетом (4) и тригонометрического соотношения $\cos(\arctg x) = \frac{1}{\sqrt{1+x^2}}$ для дальности d до исследуемого рассеивающего объема окончательно имеем

$$d > 0,5 \Delta_1 \left(\frac{L_{\min}}{2\Delta_2} - \frac{2\Delta_2}{L_{\min}} \right). \quad (8)$$

Полученное выражение (8) позволяет для заданного L_{\min} определить дальность до исследуемого объема среды с учетом параметров схемы зондирования (заданного расстояния между приемниками (Δ_2), источником и приемником (Δ_1)), на которой возможно определение оптических характеристик исследуемого объема с заданной погрешностью измерения сигнала (δS) и состоянием среды (S_m).

Проанализируем предельные случаи в выражении (8). При $L_{\min} = 2\Delta_2$ величина $d = 0$. Это означает, что путь, проходимый зондирующим импульсом, равен расстоянию между приемниками. Очевидно, что в этом случае зондирующие импульсы должны посылаться навстречу друг другу по прямой, соединяющей эти приемники. Тогда обычно и $\Delta_1 = 0$, т.е. источники и приемники должны быть совмещены. Случай схемы зондирования при посылке излучения навстречу друг другу рассматривался в [7]. При $\Delta_2 \rightarrow 0$ (приемники сближены) $d \rightarrow \infty$. Это означает, что заданное значение L_{\min} будет достигаться в положительной полуплоскости на бесконечности. Если $L \rightarrow 0$, то $d \rightarrow -\infty$. Физический смысл данного результата в том, что заданное малое значение $L_{\min} \rightarrow 0$ в положительной полуплоскости будет достигаться при посылке зондирующего излучения из отрицательной полуплоскости.

Из только что изложенного можно заключить, что для получения $L_{\min} = 2\Delta_2$, при заданном Δ_2 , произвольно малые значения L_{\min} (меньше Δ_2) рассматривать нельзя.

Анализ результатов численных расчетов d по формуле (8), приведенных в табл. 1, позволяет заключить, что при заданных параметрах схемы зондирования (Δ_2, Δ_1), состоянии объекта исследования (S_m) с ростом погрешности измерений (δS) для получения корректных результатов (подразумеваемая выполнение соотношения (4)) необходимо увеличивать расстояние d до объема зондирования.

Таблица 1

Результаты численных расчетов дальности до объекта исследования при заданных параметрах схемы зондирования, погрешности измерений и состоянии среды

$\delta S = 0,5\%, S_m = 20 \text{ км}$						
	$\Delta_1 = 1 \text{ м}$			$\Delta_1 = 5 \text{ м}$		
	$\Delta_2 = 1 \text{ м}$	$\Delta_2 = 3 \text{ м}$	$\Delta_2 = 5 \text{ м}$	$\Delta_2 = 3 \text{ м}$	$\Delta_2 = 5 \text{ м}$	$\Delta_2 = 10 \text{ м}$
$d \geq$	25,8 м	8,6 м	5,1 м	42,8 м	25,5 м	12,4 м
$\delta S = 3\%, S_m = 20 \text{ км}$						
	$\Delta_1 = 1 \text{ м}$			$\Delta_1 = 5 \text{ м}$		
	$\Delta_2 = 1 \text{ м}$	$\Delta_2 = 3 \text{ м}$	$\Delta_2 = 5 \text{ м}$	$\Delta_2 = 3 \text{ м}$	$\Delta_2 = 5 \text{ м}$	$\Delta_2 = 10 \text{ м}$
$d \geq$	158,7 м	52,9 м	31,7 м	264,4 м	158,6 м	79,2 м
$\delta S = 0,5\%, \epsilon = 0,05 \text{ м}^{-1}$						
	$\Delta_2 = 0,1 \text{ м}$			$\Delta_2 = 0,2 \text{ м}$		
	$\Delta_1 = 0,1 \text{ м}$	$\Delta_1 = 0,3 \text{ м}$	$\Delta_1 = 0,5 \text{ м}$	$\Delta_1 = 0,1 \text{ м}$	$\Delta_1 = 0,3 \text{ м}$	$\Delta_1 = 0,5 \text{ м}$
$d \geq$	0,08 м	0,23 м	0,38 м	0,0005 м	0,002 м	0,003 м
$\delta S = 3\%, \epsilon = 0,05 \text{ м}^{-1}$						
	$\Delta_2 = 0,1 \text{ м}$			$\Delta_2 = 0,2 \text{ м}$		
	$\Delta_1 = 0,1 \text{ м}$	$\Delta_1 = 0,3 \text{ м}$	$\Delta_1 = 0,5 \text{ м}$	$\Delta_1 = 0,1 \text{ м}$	$\Delta_1 = 0,3 \text{ м}$	$\Delta_1 = 0,5 \text{ м}$
$d \geq$	0,62 м	1,84 м	3,07 м	0,19 м	0,58 м	0,97 м
$\delta S = 0,5\%, \epsilon = 0,1 \text{ м}^{-1}$						
	$\Delta_2 = 0,1 \text{ м}$			$\Delta_2 = 0,05 \text{ м}$		
	$\Delta_1 = 0,1 \text{ м}$	$\Delta_1 = 0,3 \text{ м}$	$\Delta_1 = 0,5 \text{ м}$	$\Delta_1 = 0,05 \text{ м}$	$\Delta_1 = 0,1 \text{ м}$	$\Delta_1 = 0,2 \text{ м}$
$d \geq$	0,0005 м	0,002 м	0,003 м	0,038 м	0,076 м	0,15 м
$\delta S = 3\%, \epsilon = 0,1 \text{ м}^{-1}$						
	$\Delta_2 = 0,1 \text{ м}$			$\Delta_2 = 0,2 \text{ м}$		
	$\Delta_1 = 0,1 \text{ м}$	$\Delta_1 = 0,3 \text{ м}$	$\Delta_1 = 0,5 \text{ м}$	$\Delta_1 = 0,1 \text{ м}$	$\Delta_1 = 0,3 \text{ м}$	$\Delta_1 = 0,5 \text{ м}$
$d \geq$	0,30 м	0,90 м	1,51 м	0,14 м	0,42 м	0,69 м

Для водных рассеивающих сред ($\epsilon \sim 0,01 \div 1 \text{ м}^{-1}$) значения d при Δ_2 , равном единицам – десяткам сантиметров, значительно меньше, поскольку S_m , а значит, и L_{\min} , для таких сред на 2–3 порядка меньше, чем для атмосферы.

Возможна постановка следующего вопроса: какое расстояние между источником и приемником (Δ_1) необходимо для того, чтобы проводить измерения оптических характеристик заданного объема (S_m), находящегося на расстоянии d , с заданной погрешностью измерения δS при расстоянии между приемниками Δ_2 . Для решения этой задачи будем исходить из (8). После преобразований решение относительно Δ_1 принимает следующий вид:

$$\Delta_1 \leq 4 \frac{\Delta_2 L_{\min}}{L_{\min}^2 - 4\Delta_2^2} d. \quad (9)$$

Это означает, что для проведения измерений объема среды, находящегося на расстоянии d , с заданными погрешностью (δS) и расстоянием между приемниками (Δ_2), максимально устанавливаемая база Δ_1 между источниками и приемниками излучения определяется по формуле (9). Необходимо отметить, что (9) справедливо только при условии $2\Delta_2 \leq L_{\min}$. В противном случае (при $L_{\min} < 2\Delta_2$) на Δ_1 ограничения не накладываются.

Из (9) следует, что при $2\Delta_2 = L_{\min}$ (зондирование навстречу друг другу) расстояние Δ_1 между приемно-излучающими устройствами в принципе не ог-

раничивается ($\Delta_1 \rightarrow \infty$), хотя на практике из-за конечности параметров приемно-излучающих блоков (энергии, чувствительности, т.п.), наличия фонового излучения и шумов Δ_1 не может быть бесконечно большим.

Результаты численных расчетов Δ_2 по формуле (9) приведены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты численных расчетов базы между источником и приемником при заданных дальности до объекта исследования, погрешности измерений и состоянии среды

$\delta S = 0,5\%, S_m = 39 \text{ км}$				
	$d = 500 \text{ м}$		$d = 3000 \text{ м}$	
	$\Delta_2 = 1 \text{ м}$	$\Delta_2 = 5 \text{ м}$	$\Delta_2 = 1 \text{ м}$	$\Delta_2 = 5 \text{ м}$
$\Delta_1 \leq$	9,95 м	49,87 м	59,71 м	299,23 м
$\delta S = 3\%, S_m = 39 \text{ км}$				
	$d = 500 \text{ м}$		$d = 3000 \text{ м}$	
	$\Delta_2 = 1 \text{ м}$	$\Delta_2 = 5 \text{ м}$	$\Delta_2 = 1 \text{ м}$	$\Delta_2 = 5 \text{ м}$
$\Delta_1 \leq$	1,62 м	8,08 м	9,69 м	48,49 м
$\delta S = 0,5\%, S_m = 20 \text{ км}$				
	$d = 500 \text{ м}$		$d = 3000 \text{ м}$	
	$\Delta_2 = 1 \text{ м}$	$\Delta_2 = 5 \text{ м}$	$\Delta_2 = 1 \text{ м}$	$\Delta_2 = 5 \text{ м}$
$\Delta_1 \leq$	19,41 м	97,93 м	116,46 м	587,6 м
$\delta S = 3\%, S_m = 20 \text{ км}$				
	$d = 500 \text{ м}$		$d = 3000 \text{ м}$	
	$\Delta_2 = 1 \text{ м}$	$\Delta_2 = 5 \text{ м}$	$\Delta_2 = 1 \text{ м}$	$\Delta_2 = 5 \text{ м}$
$\Delta_1 \leq$	3,15 м	15,76 м	18,91 м	94,57 м

Результаты расчетов базы между источниками и приемниками Δ_1 (9) при заданных параметрах схемы зондирования Δ_2 и дальности до объекта зондирования показывают, что, с одной стороны, для достижения минимального пространственного разрешения с ростом погрешности измерений δS необходимо уменьшать базу Δ_1 (при $S_m = \text{const}$) и, с другой стороны, при постоянном уровне погрешности δS с ухудшением метеорологической видимости (S_m) Δ_1 надо увеличивать.

Таким образом, получены соотношения, связывающие параметры схемы томографического зондирования (расстояние между источником и приемником Δ_1 , расстояние между приемниками Δ_2), дальностью до объекта зондирования d , погрешностью измерения δS , состоянием исследуемой среды (S_m). Полученные соотношения позволяют задавать параметры схемы зондирования в практически любой экспериментальной обстановке.

М.М. Кугейко, Д.М. Оношко. Relations between parameters of scattering medium and measuring equipment in bistatic tomographic sensing.

The relations connecting parameters of the state of an investigated medium (meteorological range of visibility), parameters of the bistatic sensing scheme (distance between receivers, emitters of radiation), distance up to researched layers are obtained. The connection of a minimum spatial resolution with optical characteristics of a medium and the error of the measuring equipment is established. The obtained relations will allow one to establish parameters of bistatic tomographic scheme of sensing for particular meteorological and hydrological situations.

1. А. с. №1798664 СССР, МКИ G01W1/00. Способ определения оптических характеристик рассеивающих сред // Кугейко М.М. Оpubл. ОБИ. 1993. № 8.
2. Веретенников В.В. О решении уравнения лидарного томографического зондирования // Оптика атмосф. 1991. Т. 4. № 6. С. 638–644.
3. Кугейко М.М. Оперативная динамическая томография атмосферы // Исслед. Земли из космоса. 2000. № 1. С. 42–45.
4. Тихонов А.М., Арсенин В.Я. Методы решения некорректных задач. М.: Наука, 1979. 286 с.
5. Кугейко М.М., Оношко Д.М. К теории томографического зондирования // Оптика атмосф. и океана. 1998. Т. 11. № 12. С. 1333–1336.
6. Волохтюк В.А., Кочетков В.М., Красовский Р.Р. Вопросы оптической локации. М.: Сов. радио, 1972. 256 с.
7. Фираго В.А., Кугейко М.М. Прецизионный лазерный измеритель коэффициента ослабления излучения, прозрачности и мутности жидких сред // Труды III конференции по лазерной физике и оптоэлектронике. Минск, 1997. С. 314–317.