

И.Л. Кацев, Э.П. Зеге

**О СООТНОШЕНИИ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ТЕЛЕВИЗИОННЫХ И ЛОКАЦИОННЫХ СИСТЕМ ОБНАРУЖЕНИЯ ОБЪЕКТА В РАССЕИВАЮЩЕЙ СРЕДЕ**

Показано, что при одинаковых требованиях к объему получаемой информации принципиальные возможности телевизионной и локационной систем одинаковы. При наличии априорной информации о направлении на объект дальность локации (дальнометрии) при той же энергии источника увеличивается в несколько раз. Получены соотношения для оптимального апертурного угла приема, при котором отношение сигнал-шум максимально.

В работе [1] был рассмотрен вопрос о дальности телевизионного и визуального обнаружения объекта в рассеивающей среде (в море, в облаках, в замутненной атмосфере). Согласно выдвинутой в [1] концепции как при визуальном наблюдении, так и при рассмотрении телевизионного изображения наблюдатель проводит в некотором смысле оптимальную обработку изображения, т. е. выбирает площадь элемента пространственного интегрирования изображения  $\sum_{эл}^{opt}$  таким образом, чтобы обеспечить максимум отношения сигнал-шум. В рамках этой концепции были получены соотношения, позволяющие в замкнутой форме определять одновременно как предельную дальность обнаружения объекта, так и оптимальный элемент пространственного интегрирования  $\sum_{эл}^{opt}$ .

Одним из основных современных способов обнаружения объекта является импульсная локация. При этом локационные системы, как и телевизионные, позволяют не только обнаруживать объект, но и формировать его изображение [2, 3]. Поэтому естественно поставить вопрос о соотношении возможностей телевизионных и локационных систем обнаружения. Чтобы полнее ответить на этот вопрос, рассмотрим сначала сравнительно простой случай, когда направление на объект известно и требуется лишь подтвердить его наличие и определить расстояние до него. По сути здесь речь идет о дальнометрии (например, импульсная локация морского дна). Ясно, что в этом случае дальность локации наибольшая и ее можно принять в качестве границы возможностей систем импульсной локации.

**Локация в заданном направлении (дальнометрия).** Пусть кратковременный импульс излучения направлен в центр объекта. Фотоприемник, ось которого также направлена в центр объекта, расположен рядом с излучателем и регистрирует зависящую от времени мощность отраженного сигнала. О наличии объекта и о расстоянии до него судят по локационному «всплеску» на фоне помехи обратного рассеяния (ПОР). Величиной, определяющей возможность обнаружения объекта в этом случае, является отношение сигнал-шум

$$\delta = \frac{\Delta W}{\sqrt{W_{\phi}/C + \alpha_2 W_{\phi}^2}}, \quad (1)$$

где  $\Delta W$  — энергия локационного, т.е. полезного сигнала за время  $\Delta t_{эл}$ , определяемое временным разрешением приемника;  $W_{\phi}$  — энергия фона (ПОР), попадающая на фотоприемник в отсутствие объекта за это же время;  $C$  — константа приемника, определяющая его квантовую эффективность;  $\alpha_2$  — параметр, определяющий внутренние шумы приемной системы и связывающий пороговый контраст системы  $k_n$  и пороговое отношение сигнал-шум  $\delta_n$  соотношением  $k_n = \delta_n \sqrt{\alpha_2}$  [1].

При распространении импульса излучения в рассеивающей среде его форма вследствие многократного рассеяния изменяется. Поэтому в общем случае величины  $\Delta W$  и  $W_{\phi}$  зависят не только от  $\Delta t_{эл}$  и длительности исходного импульса  $\Delta t_0$ , но и от характерных времен  $\Delta t_{л}$  и  $\Delta t_{пор}$ , определяющих временное «размытие» мгновенного импульса в среде соответственно для локационного сигнала и для ПОР. Строгий расчет  $\Delta t_{л}$  и  $\Delta t_{пор}$  и соответственно  $\Delta W$  и  $W_{\phi}$  требует применения результатов теории нестационарного рассеяния света [4]. Мы ограничимся здесь сравнительно простым, но практически важным и наиболее часто встречающимся случаем, когда уширение локационного сигнала невелико и  $\Delta t_{пор} \gg \Delta t_0 \gg \Delta t_{л}$ . В этом случае оптимальное значение  $\Delta t_{эл} \approx \Delta t_{л}$  [5], и для расчета энергии полезного сигнала  $\Delta W$  можно воспользоваться решениями теории переноса излучения для стационарного случая. Для расчета энергии ПОР  $W_{\phi}$  можно использовать известные в теории нестационарного рассеяния света простые аналитические решения, например, квазиднократное приближение или асимптотические временные решения [4]. По сути такой подход был применен в [5], где была рассчитана дальность оптической локации в морской воде при некоторых фиксированных оптико-геометрических параметрах системы.

Как известно [6], энергия полезного сигнала на фотоприемнике равна

$$\Delta W = \frac{W_0 \Sigma_{\text{пр}} \Omega_{\text{пр}}}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} A(r) E_{\text{н}}(r - r_0) E_{\text{п}}(r - r_0) dr, \quad (2)$$

где  $W_0$  – энергия источника в импульсе;  $\Sigma_{\text{пр}}$  и  $\Omega_{\text{пр}}$  – площадь входного зрачка и телесный угол фотоприемника,  $A(r)$  – распределение альbedo объекта по координате  $r$  в плоскости  $z = z_0 = \text{const}$ , перпендикулярной оси источника;  $E_{\text{н}}(r)$  – распределение освещенности, создаваемое в плоскости объекта  $z = z_0$  источником единичной мощности с диаграммой направленности истинного источника;  $E_{\text{п}}(r)$  – соответствующее распределение от фиктивного источника с диаграммой направленности, совпадающей с диаграммой чувствительности реального приемника;  $r_0$  – точка в плоскости объекта, в которую направлены оси источника и приемника.

Положим для простоты, что функции  $A(r)$ ,  $E_{\text{н}}(r)$  и  $E_{\text{п}}(r)$  обладают азимутальной симметрией и их можно аппроксимировать гауссовым распределением. Тогда на основании (2) при  $r_0 = 0$  получим:

$$\Delta W = \frac{W_0 \Sigma_{\text{пр}} \langle A \rangle S^2(z_0)}{\pi z_0^2} \frac{D_{\text{пр}} D_{\text{об}}}{D_{\text{об}} + D_a} \frac{1}{D_{\text{ист}} + D_{\text{пр}} + 2D_r}; \quad (3)$$

$$D_a = \frac{(D_{\text{ист}} + D_r)(D_{\text{пр}} + D_r)}{D_{\text{ист}} + D_{\text{пр}} + 2D_r}, \quad (4)$$

где  $S(z_0)$  – нулевой пространственный момент функции размытия точки (ФРТ) среды, т.е. пропускание слоя толщиной  $z_0$ ;  $\Sigma_{\text{об}}$  и  $\langle A \rangle$  – площадь и среднее альbedo объекта;  $D_{\text{об}} = \Sigma_{\text{об}}/2\pi$ ;  $D_{\text{пр}} = \Omega_{\text{пр}} z_0^2 / 2\pi$ ;  $D_{\text{ист}} = \Omega_{\text{ист}} z_0^2 / 2\pi$ ;  $\Omega_{\text{ист}}$  – телесный угол источника;  $D_r$  – дисперсия ФРТ среды;  $D_a$  – дисперсия функции  $a(r) = E_{\text{н}}(r)E_{\text{п}}(r)$ . При  $D_{\text{об}} \rightarrow \infty$  и  $D_{\text{пр}} \gg D_{\text{ист}} + 2D_r$  (или  $D_{\text{ист}} \gg D_{\text{пр}} + 2D_r$ ) из формул (3)–(4) вытекают известные соотношения [4, 6] для коэффициента передачи полезного сигнала  $\eta_{\text{пор}} = \Delta W / W_0 = \langle A \rangle$  соответственно в системах видения типа «узкий – широкий» или «широкий – узкий».

При расчете  $W_{\text{ф}}$  будем считать, как это делается в квазиоднократном приближении, что ПОР в момент времени  $t = 2z_0/v$  ( $v$  – скорость света в среде), соответствующий приходу локационного сигнала, обусловлена рассеянием излучения в слое толщиной  $v\Delta t_{\text{эл}}/2$ , расположенном на глубине  $z_0$ . Поэтому приближенное выражение для  $W_{\text{ф}}$  можно получить непосредственно из формулы (3), заменив в ней  $\langle A \rangle$  на коэффициент яркости излучения, отраженного назад этим слоем, т.е. на величину  $\sigma\chi(\pi)v\Delta t_{\text{эл}}/2$  ( $\sigma$  – показатель рассеяния,  $\chi(\pi)$  – индикатриса рассеяния в направлении «назад»), и полагая  $D_{\text{об}} \rightarrow \infty$ :

Соотношения (2)–(5) удобны для анализа возможностей локационной системы. Рассмотрим для примера вопрос об оптимальном выборе телесного угла приема  $\Omega_{\text{пр}}$ . Оптимальным будем считать угол  $\Omega_{\text{пр}}^{\text{опт}}$ , при котором максимально отношение сигнал-шум. Поэтому  $D_{\text{пр}}^{\text{опт}}$  (и соответственно  $\Omega_{\text{пр}}^{\text{опт}}$ ) можно найти из условия

$$d\delta / dD_{\text{пр}} = 0. \quad (6)$$

Несложный анализ показывает, что само существование оптимума  $D_{\text{пр}}$  и  $D_{\text{пр}}^{\text{опт}}$  зависят от того, какой тип шумов (дробовые или внутренние шумы) в локационной системе является преобладающим, т.е. от соотношения  $1/C$  и  $\alpha_2 W_{\text{ф}}$ . Вычисление  $D_{\text{пр}}^{\text{опт}}$  на основании (1), (6) с учетом (3)–(5) в общем случае несложно, но требует проведения расчета с учетом всех оптико-геометрических и энергетических параметров системы. Поэтому здесь мы ограничимся двумя важными предельными случаями, в которых анализ возможен без задания конкретных значений параметров системы.

1.  $\alpha_2 C W_{\text{ф}} \gg 1$ . Этот случай наблюдается при очень большой энергии излучателя. Здесь дальность локации ограничивается внутренними шумами системы и определяется условием  $k = \Delta W / W_{\text{ф}} > k_{\text{п}}$ . Легко показать, что при этом не существует оптимума по  $D_{\text{пр}}$  и отношение сигнал-шум тем больше, чем меньше  $D_{\text{пр}}$ . Уместно заметить, что уменьшение  $D_{\text{пр}}$  реально возможно лишь до определенного предела, так как при  $D_{\text{пр}} \rightarrow 0$  значение  $W_{\text{ф}} \rightarrow 0$  и нарушается исходное условие.

2. Как правило, имеет место другая ситуация, когда  $(\alpha_2 C W_{\text{ф}} \ll 1$  и ограничение по дальности локации обусловлено дробовыми шумами фотоприемника. В этом случае имеем

$$D_{\text{пр}}^{\text{опт}} = \frac{\Gamma_{\text{об}}(D_{\text{ист}} + 2D_r) + D_r(\Gamma_{\text{ист}} + \Gamma_r)}{D_{\text{ист}}(D_{\text{ист}} + D_r)/(D_{\text{ист}} + 2D_r) - D_{\text{об}}} \quad (7)$$

Из формулы (7) видно, что для существования оптимума  $D_{\text{пр}}$  требуется выполнение условия:

$$D_{\text{об}} < D_{\text{ист}}(D_{\text{ист}} + D_r)/(D_{\text{ист}} + 2D_r). \quad (8)$$

Заметим, что из (8) следует необходимое (но недостаточное) условие

$$D_{\text{об}} < D_{\text{ист}}. \quad (9)$$

Таким образом, если пятно нерассеянного излучения в плоскости объекта меньше площади объекта, то оптимального угла приема не существует и отношение сигнал-шум  $\delta$  тем больше, чем больше  $D_{\text{пр}}$ . В то же время ясно, что при фиксированной энергии источника величина  $\delta$  тем больше, чем меньше  $D_{\text{ист}}$ . Поэтому максимальное отношение сигнал-шум в рассматриваемом случае достигается при  $D_{\text{ист}} \rightarrow 0$ ,  $D_{\text{пр}} \rightarrow \infty$ .

Рассмотрим теперь более общую задачу локации, а именно: обнаружение объекта, направление на который заранее не известно. В этом случае, чтобы определить положение объекта, необходимо осуществить сканирование последовательностью коротких импульсов в некоторой зоне поиска. Техническая реализация такой системы описана, например, в [2, 3]. Здесь зарегистрированный приемником сигнал от каждого импульса излучателя разделяется на ряд интервалов длительностью  $\Delta t_{\text{эл}}$  и запоминается, причем  $i$ -и интервал соответствует приходу излучения от участка среды, расположенного на расстоянии  $z_i = vt_i/2$  от локатора. Затем в результате пространственного сканирования узким пучком в зоне поиска формируется набор изображений слоев толщиной  $v\Delta t_{\text{эл}}/2$ , находящихся на различных расстояниях  $z_i$  от локатора. Ясно, что такая система, которую мы будем называть локатором с формированием изображения, есть полный аналог импульсной системы видения «узкий — широкий», т. е. системы типа «1» [6]. Современные телевизионные системы, как правило, реализуются как системы типа «2» (широкий — узкий). Таким образом, вопрос о сопоставлении локационной и телевизионной систем сводится к сопоставлению систем видения типа «1» и типа «2» с временным стробированием сигнала. Поэтому все характеристики, относящиеся к локационной системе, будем отмечать индексом «1», а характеристики телевизионной системы — индексом «2».

Будем считать, что телесный угол  $\Omega_{\text{пр}}^{(1)} = \Omega_{\text{ист}}^{(2)}$  достаточно велик (значительно больше углового размера функции размытия), а телесный угол  $\Omega_{\text{ист}}^{(1)} = \Omega_{\text{пр}}^{(2)}$  достаточно мал. Пусть, кроме того, энергия источника, затраченная на формирование изображения одного и того же кадра, в обоих типах систем одинакова. Это означает, что если для осмотра кадра площадью  $\Omega_{\text{ист}}^{(2)} z_0^2$  локатор посылает  $m$  импульсов, то в телевизионной системе „2“ изображение накапливается по  $m = \Omega_{\text{ист}}^{(2)} / \Omega_{\text{ист}}^{(1)}$  импульсам. Будем считать также, что интервал стробирования  $\Delta t_{\text{эл}}^{(2)} = \Delta t_{\text{эл}}^{(1)}$ , чувствительность фотоприемников, характеристики внутренних шумов и другие аналогичные параметры в обоих типах систем одинаковы. Тогда на основании анализа, проведенного в [7, 9], мы приходим к важному выводу, что отношение сигнал-шум и дальность обнаружения объема в сравниваемых системах одинаковы.

Мы считали, что телесный угол источника  $\Omega_{\text{ист}}^{(1)}$  в локационной системе формирования изображения достаточно мал ( $D_{\text{ист}} \ll D_r$ ). Это дает возможность при обработке изображения, например, при наблюдении оператором изображения, сформированного на экране, выбирать оптимальный элемент пространственного интегрирования  $\sum_{\text{эл}}^{\text{опт}}$ , при котором отношение сигнал-шум  $\delta$  и дальность обнаружения объекта максимальны. Однако для сканирования в достаточно большой зоне поиска с малым телесным углом  $\Omega_{\text{ист}}^{(1)}$  необходим источник с большой частотой повторения импульсов. Действительно, за время формирования кадра необходимо послать  $m = \Omega_{\text{ист}}^{(2)} / \Omega_{\text{ист}}^{(1)}$  импульсов. В этом отношении телевизионная система „2“, в которой малость  $\Omega_{\text{пр}}^{(2)}$  достигается достаточно простым путем, на современном этапе имеет определенное техническое преимущество. В связи с этим можно поставить вопрос: до каких пределов можно увеличить телесный угол  $\Omega_{\text{ист}}^{(1)}$  в локационной системе и соответственно уменьшить частоту повторения импульсов без заметного уменьшения дальности обнаружения? Ясно, что такое увеличение возможно до величины  $\Omega_{\text{ист}}^{(1)} \approx \sum_{\text{эл}}^{\text{опт}} / z_0^2$ .

Выше мы предположили, что телесный угол  $\Omega_{\text{ист}}^{(2)} = \Omega_{\text{пр}}^{(1)}$  достаточно велик. Если для телевизионной системы „2“ это условие является достаточно принципиальным, так как величина  $\Omega_{\text{ист}}^{(2)}$  определяет поле зрения (кадр) системы, то для локационной системы „1“ оно не является обязательным. Дей-

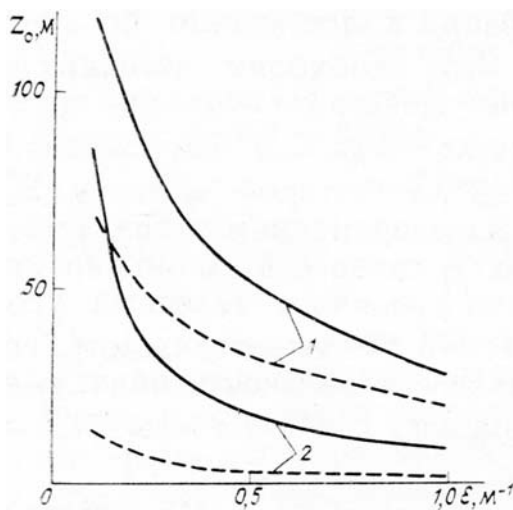
ствительно, в этом случае размер кадра определяется полем сканирования, т.е. величиной  $\Omega_{\text{ист}}^{(1)}$  и частотой повторения импульсов. В связи с этим возникает вопрос об оптимальном выборе телесного угла  $\Omega_{\text{пр}}^{(1)}$ . Легко понять, что этот же вопрос можно было бы сформулировать иначе: имеет ли система видения типа «3» (узкий—узкий) [6] принципиальные физические преимущества перед системами типа «1» и «2» при одинаковой используемой для формирования кадра энергии источника?

Известно, что система «3» обеспечивает более высокий наблюдаемый контраст изображения, однако проигрывает системе «1» по энергетике. Поэтому при достаточно большой энергии источника, когда ограничение дальности видения обусловлено пороговым контрастом, система «3» имеет преимущество перед системой «1». В этом случае оптимальным является малый угол приема  $\Omega_{\text{пр}}^{(1)}$  (см. анализ оптимального угла приема при локации в одиночном импульсе).

Однако на практике, как правило, имеет место обратная ситуация, когда ограничение по дальности обусловлено дробовыми шумами, т.е. недостатком энергии. В этом случае оптимум по  $\Omega_{\text{пр}}^{(1)}$  существует лишь при условии (9), которое, как правило, не выполняется. Поэтому в данном случае отношение сигнал-шум и дальность обнаружения тем больше, чем больше  $\Omega_{\text{пр}}^{(1)}$ . Таким образом, можно сделать вывод: при не слишком большой энергии источника и при нарушении условия (9) система «узкий—узкий» принципиально (а не только из соображений технической реализации, как отмечалось в [8]) проигрывает системе типа «1» по дальности обнаружения.

Таким образом, мы пришли к физически достаточно очевидному, но важному выводу: при одинаковых требованиях к объему информации, получаемой из зоны поиска, принципиальные возможности телевизионной и локационной систем одинаковы.

Однако в некоторых случаях, например, при наличии априорной информации о размерах объекта, дальность локационного обнаружения можно увеличить путем выбора оптимальной стратегии поиска. Действительно, в этом случае не обязательно сканировать с малым телесным углом  $\Omega_{\text{ист}}^{(1)}$  по всему кадру. В простейшем случае, ограничившись отдельными точками в кадре, отстоящими друг от друга на расстояние порядка размера объекта  $d_{\text{об}}$ , можно уменьшить число элементов в кадре до величины  $m_1 = \Omega_{\text{пр}}^{(1)} z_0^2 / d_{\text{об}}^2 < \Omega_{\text{пр}}^{(1)} / \Omega_{\text{ист}}^{(1)} = m$  и тем самым повысить энергию, приходящуюся на элемент изображения за время записи кадра. Легко понять, что платой за достигаемое таким путем увеличение дальности обнаружения является уменьшение точности определения местоположения объекта.



Дальность обнаружения квадратного объекта с альбедо  $\langle A \rangle = 0,1$  со стороны 1 м (1) и 30 м (2) в воде с помощью локационной в одиночном импульсе (сплошная линия) и телевизионной (штриховая линия) систем в зависимости от показателя ослабления воды при  $\Delta t_{\text{эл}} = 10 \text{ нс}$

Каковы же возможности увеличения таким путем дальности обнаружения? В общем случае этот вопрос далеко не простой. Однако верхнюю границу указать несложно. Пределом здесь является дальность локации в заданном направлении с энергией источника, предназначенной для формирования всего кадра. На рисунке дано сопоставление дальностей обнаружения объекта с помощью локационной в одиночном импульсе и телевизионной систем. Видно, что для малых объектов наличие априорной информации о направлении на объект позволяет в несколько раз увеличить дальность его обнаружения.

1. Кацев И.Л., Зеге Э.П. //Изв. АН СССР. Сер. ФАО. 1989. Т. 25. № 7. С. 732–740.
2. Couttenay T.H., Boulter J.F., Henshall H. //Infrared. Phys. 1976. V. 16. P. 95.
3. Матвеев И.Н., Прокопов В.В., Троицкий И.Н., Устинов Н.Д. Лазерная локация. М.: Машиностроение, 1984. 271 с.
4. Зеге Э.П., Иванов А.П., Кацев И.Л. Перенос изображения в рассеивающей среде. Минск: Наука и техника, 1985. 327 с.
5. Иванов А.П., Колесник А.И. //Оптика атмосферы. 1989. Т. 2. № 2. С. 146–153.
6. Браво-Животовский Д.М., Долин Л.С., Лучинин А.Г., Савельев В.А. //Изв. АН СССР. Сер. ФАО. 1969. Т. 5. № 7. С. 672–684.
7. Браво-Животовский Д.М., Долин Л.С., Левин И.М., Лучинин А.Г., Савельев В.А. //Изв. АН СССР. Сер. ФАО. 1971. Т. 7. № 11. С. 1143–1152.
8. Левин И.М. //Оптика океана. Т. 2. Прикладная оптика океана. М.: Наука, 1983. С. 187–199.

Институт физики АН БССР,  
Минск

Поступила в редакцию  
11 сентября 1989 г.

**I. L. Katsev, E. P. Zege. Comparison of the Capabilities of TV and Lidar Systems to Detect Objects in a Scattering Medium.**

It is shown in the paper that, in principle, the potentialities of the TV and lidar systems are equal provided that requirements to the bulk of information to be obtained are same. A priori information on the direction to the object allows one to increase significantly the detection range at the same energy of the radiation source. Expressions are obtained in the paper for estimating the optimal receiving aperture angle yielding the maximum signal-to-noise ratio.