

# Оптические системы и материалы

УДК 621.383

## Анализ характеристик систем оптической локации на основе матричных фотоприемников

В. Г. Карельский

ОАО «НПО «Энергомаш им. акад. В. П. Глушко»», г. Химки, Московская обл., Россия

*Исследованы вопросы согласования элементов систем оптической локации при использовании матричных фотоприемников, обеспечивающих детальное разрешение целей. Представлен вывод уравнения канала локации, в общем виде определяющего требования к подсветке в зависимости от параметров приема—передачи локационных сигналов, детектирования и формирования изображения цели. Показаны возможности использования полученной зависимости для определения основных характеристик и качества локационного канала.*

С совершенствованием матричных фотоприемных устройств и цифровой видеотехники связано дальнейшее развитие локационных систем оптического диапазона, отличающихся высокой светочувствительностью и одновременно возможностью распознавания объектов наблюдения.

Существующие расчетные методы, основанные на статистическом и корреляционном анализе принимаемых сигналов [1], чересчур сложны и не дают наглядного представления о некоторых интересных аспектах оптической локации с лазерной подсветкой.

В своей работе по данной теме [2] автор акцентировал внимание на возможности оптимизации условий работы ИК-систем наблюдения при использовании лазерной подсветки в диапазоне 3—5 мкм. Там же были приведены условия, определяющие необходимость подсветки цели, и уравнение канала локации, связывающее условия освещенности и параметры, влияющие на прием эхо-сигнала и его детектирование. За время, прошедшее с момента публикации, возникла необходимость более подробного анализа данного уравнения и его уточнения в части оптических параметров приемной системы.

В частности, много вопросов возникло в связи с тем, что, согласно представленным в [2] уравнениям, мощность локационного сигнала, приходящегося на отдельный элемент матрицы, напрямую не зависит от дальности локации. Необходимость дополнительных пояснений вызвана еще и тем, что автор не останавливался на данном факте подробно, считая его достаточно очевидным и естественным.

Действительно, рассмотрим природный датчик с построением изображения на основе ногоэлементного фотоприемного устройства,

каким является глаз человека. Глаз как устройство локации работает по двухпозиционной схеме, используя солнечную либо искусственную подсветку. Легко убедиться что субъективное ощущение освещенности любого предмета практически не зависит от удаленности этого предмета.

В то же время при увеличении удаленности источника подсветки неизбежно происходит снижение освещенности окружающих предметов по закону  $1/L_1^2$  ( $L_1$  — расстояние), и глаз сразу же на это реагирует, так же, как на ухудшение пропускания атмосферы. Все эти зависимости нашли отражение в упомянутом выше уравнении канала локации [2]. Однако при выводе самого уравнения были использованы допущения, снижающие его информативность. Поэтому в целях уточнения и более подробного обсуждения предлагаемого подхода рассмотрим вывод уравнения канала локации и проведем его предварительный анализ.

### Вывод уравнения канала локации

Как и в работе [2], используем упрощенный подход с использованием известных закономерностей распространения локационных сигналов, не учитывая функций распределения поля в плоскости цели, а также на приемной и передающей апертурах. В этом случае расчеты будут направлены лишь на получение приблизительных оценок уровня принимаемых сигналов, что позволит ориентировочно подбирать такие параметры канала локации, при которых детектируемый сигнал попадает в нужную область динамического диапазона фотоприемного устройства.

Рассмотрим прием локационного сигнала от диффузно отражающего объекта с эффективной площадью рассеяния  $S_{эф}$  и спектральным альбедо  $A_\lambda$ . Схема канала локации показана на рисунке. Изображение объекта регистрируется обычной ПЗС-матрицей с двухкоординатной адресацией.

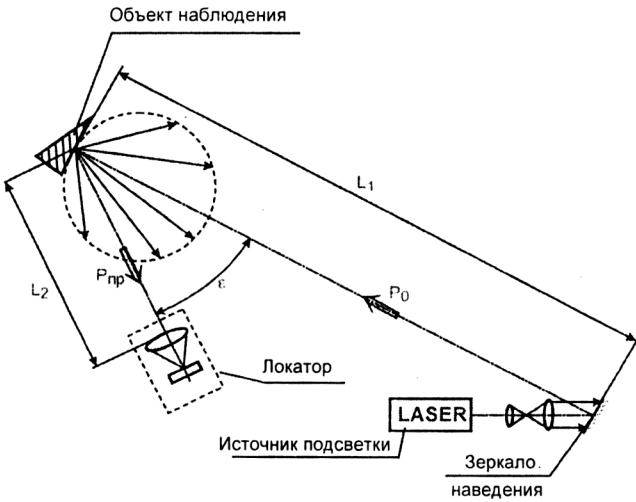


Схема канала локации

В общем случае расстояние от объекта до локатора может не совпадать с расстоянием от объекта до источника подсветки. Обозначим дистанцию подсветки  $L_1$  и дальность локации  $L_2$ , при этом характерные размеры объекта  $\rho(x, y) \ll L_{1,2}$ .

Лучистый поток  $P_3$ , рассеянный в полупространство при подсветке объекта с характерным размером  $\rho(x, y) \ll \Theta L_1$ , определяется по формуле

$$P_3 = \bar{E}_3 S_{эф} A_\lambda. \quad (1)$$

При характеристиках лазерного источника подсветки:  $P_0$  — мощность и  $\Theta$  — расходимость, средняя энергетическая освещенность на поверхности объекта составит

$$\bar{E}_3 = \frac{4P_0 \tau_1}{\pi L_1^2 \Theta^2}, \quad (2)$$

где  $\tau_1$  — пропускание атмосферы на трассе  $L_1$ .

Будем считать, что оси пучка подсветки и фотометрической поверхности совпадают и обозначим  $\varepsilon$  — угол между направлениями подсветки и осью приемника. Силу света в направлении приемной апертуры локатора,  $I(\varepsilon)$ , можно определить с учетом (1) и (2) по известным формулам фотометрии

$$I(\varepsilon) = \frac{1}{\pi} \bar{E}_3 S_{эф} A_\lambda \cos \varepsilon. \quad (3)$$

Обозначим пропускание трассы на участке  $L_2$  как  $\tau_2$ , а пропускание оптического тракта локатора  $\tau_3$ .

Учитывая телесный угловой размер входного зрачка локатора  $\Omega = \pi \vartheta^2 / L_1^2$ , где  $\vartheta$  — приемная апертура, после подстановки (2) и характеристик канала получим из формулы (3) выражение для оценки мощности эхо-сигнала, попадающего на матрицу

$$P_{пр} = \frac{4P_0 S_{эф} A_\lambda \vartheta^2 \tau_1 \tau_2 \tau_3}{\pi \Theta^2 L_1^2 L_2^2}. \quad (4)$$

Заменим в (4) множитель  $4P_0 / \pi \Theta^2$  на величину  $I_0$  — энергетическую силу подсветки.

Обозначим также общее пропускание канала локации  $T^* = \tau_1 \tau_2 \tau_3$ .

Будем считать, что в плоскости фотоприемников формируется стигматическое изображение объекта, состоящее из  $n^2$  элементов (пикселей) размером  $d_i$  каждый. Следовательно, характерный размер изображения  $\rho'(x, y) = n d_i$ , а на единственный фотоприемник приходится участок матрицы площадью  $d_i^2$ . При этом число пикселей изображения вдоль каждого регистра матрицы можно выразить как  $n = \rho(x, y) / L_2 \cdot \Delta\varphi$ , где  $\rho(x, y) / L_2$  — характерный угловой размер объекта, а  $\Delta\varphi$  — разрешающая способность локатора по углу, определяемая дискретностью фотоприемного устройства.

Величина детектируемого сигнала зависит от топологии матрицы и размеров светочувствительных элементов. Поэтому используем поправочный коэффициент  $k_s = S_i / d_i^2$ , где  $S_i$  — площадь светочувствительного элемента.

Принимая среднюю облученность единичного фотоприемника в зоне изображения  $P_i = k_s P_{пр} / n^2$ , после подстановки соответствующих величин и сокращений получим

$$P_i = \frac{k_s I_0 A_\lambda T^* \Delta\varphi^2 \vartheta^2}{L_1^2} \cdot \cos \varepsilon. \quad (5)$$

При выводе уравнения (5) становится очевидным, почему дальность локации  $L_2$  не влияет на облученность светочувствительных элементов матрицы. Любое изменение  $L_2$  сопровождается соответствующим изменением принимаемого сигнала  $P_{пр}$ , но и одновременно пропорциональным изменением размеров изображения объекта и, следовательно, числа пикселей изображения. В итоге средняя облученность элементов матрицы остается без изменения. Это правило действует до тех пор, пока изображение объекта не сведется в точку (при достаточно больших  $L_2$ ), т. е. уменьшится до размеров 1–2 элементов вдоль каждого регистра матрицы.

Для вывода обобщенного уравнения локационного сигнала используем стандартное требование к облученности фотоприемника

$$P_i \geq \frac{i_c / i_{ш} \sqrt{fS_i}}{D^*}, \quad (6)$$

где  $i_c/i_{ш}$  — отношение “сигнал/шум”;  
 $f$  — полоса пропускания приемного тракта;  
 $D^*$  — обнаружительная способность фотоприемника.

Заменим в (5) апертурный размер входного зрачка на диаметр  $\vartheta = D_n/2$ , и, используя правые части уравнений (5) и (6), получим уравнение локационного канала

$$\frac{I_0}{L_1^2} \geq \frac{4}{A_\lambda T^* \cos \varepsilon} \frac{i_c / i_{ш} \sqrt{fS_i}}{k_s D^*} \frac{1}{D_n^2 \Delta\varphi^2}. \quad (7)$$

Как и в работе [2], все характеристики элементов локационного канала в (7) сгруппированы по следующим параметрам (слева направо): подсветка, условия приема—передачи, детектирование сигналов и формирование изображения.

### Рассмотрение результатов

Уравнение канала локации (7) в представленном виде позволяет выполнять анализ характеристик, схем системы локации и искать пути их оптимизации. Очевидно, что развитие локационной техники направлено на увеличение дальности и разрешающей способности приборов наблюдения, в том числе при работе в неблагоприятных условиях.

Из уравнения (7) видно, что параметр условий приема—передачи сигналов в локационной системе может быть задан сколь угодно большим, что требует соответствующей яркости лазерной подсветки и выбора оптимального, в зависимости от условий работы, спектрального диапазона. Ранее проводился сравнительный анализ эффективности передачи лучевой энергии через турбулентную атмосферу при различных длинах волн, по результатам которого можно выделить значения  $\lambda \approx 1,06$  и  $\lambda \approx 4$  мкм [3].

Бесконечно увеличивать силу источника подсветки невозможно, но лазерная техника развивается достаточно эффективно, что позволяет рассматривать практически любые задачи, связанные с локационной подсветкой. В то же время параметр детектирования у современных фотоприемников приближается к своему пределу [4].

Таким образом, разработчик локационной системы может оперировать преимущественно двумя параметрами: подсветка и формирование.

Особенности применения лазерной подсветки в средней ИК-области (3—5 мкм) были рассмотрены в работе [2]. Используем теперь уравнение канала локации (7) для оценки характеристик системы формирования изображения.

Известно, что дифракционный предел разрешающей способности оптической системы определяется по формуле  $\Delta\varphi_{\min} \approx \lambda/D_n$ , где  $\lambda$  — рабочая длина волны. При сравнении этого соотношения с параметром формирования изображения в (7) возникает потребность интерпретировать величину  $D_n\Delta\varphi$  как некую характерную или “собственную длину волны” локатора,  $\lambda_{own}$ . При этом последний множитель в правой части уравнения (7) — параметр формирования — преобразуется следующим образом:

$$\frac{1}{D_n^2 \Delta\varphi^2} = \frac{1}{\lambda_{own}^2}.$$

Параметр, равный отношению  $\lambda_{own}/\lambda$ , или сокращенно CWL (concerning wavelength) характеризует степень согласования параметров оптической приемной системы локатора и размеров матрицы. Очевидно, что величина CWL может отличаться от 1 в любую сторону. Если размер единичного фотоприемника матрицы определяется в соответствии с дифракционным пределом оптической системы локатора, то  $\lambda_{own}$  становится идентичной рабочей длине волны и  $CWL = \lambda_{own}/\lambda = 1$ . Подобный локатор обладает особенно интересными свойствами. В этом случае на мощность принимаемых элементами матрицы сигналов не влияют ни дальность локации, ни размер приемной апертуры, но при этом проявляется сильная зависимость параметров локации от длины волны. В подобных системах наиболее жесткие требования предъявляются к размерам и дискретности матрицы, но в то же время это позволяет реализовать меры по миниатюризации приемного устройства локатора и расширению его возможностей.

При постоянных прочих параметрах CWL может характеризовать соответствие требований к разрешающей способности локатора требованиям к условиям освещенности. Если  $CWL \leq 1$ , то, как следует из (7), система локации работает с предельно высоким разрешением, которое обеспечивается достаточно высокой яркостью подсветки. Наоборот, при  $CWL \gg 1$  система работает с невысоким разрешением, но в условиях недостаточной освещенности объекта наблюдения.

Рассмотрим для примера работу человеческого глаза. Как известно, размер зрачка,

т. е.  $D_n$  глаза, в зависимости от условий освещенности может меняться от  $\sim 2$  до  $\sim 8$  мм. При хорошем освещении ( $\lambda = 0,55$  мкм по максимуму светочувствительности) глаз имеет  $\Delta\varphi \approx 3 \cdot 10^{-4}$  рад, и его параметр CWL составляет  $\sim 1,1$ . В сумеречных условиях ( $\lambda = 0,51$  мкм) ухудшение освещенности компенсируется снижением разрешающей способности ( $\Delta\varphi \approx 10^{-3}$  рад), а CWL глаза увеличивается до  $\sim 20$ .

В современных устройствах оптической локации, как известно, удается совместить требования к предельно высокой разрешающей способности с другими параметрами канала локации только при использовании мощной лазерной подсветки [1]. Такой же вывод можно сделать и на основании уравнения (7).

В работе [2] было показано, что источник подсветки с DF-лазером реальной мощности за счет оптимального спектрального диапазона и яркости способен обеспечить прием локационных сигналов на ПЗС-матрицу SiPt-фотоприемников с угловым разрешением не хуже  $10^{-5}$  рад даже при потерях  $\sim 50$  дБ.

Из выполненного анализа также следует, что для расширения возможностей локации, обнаружения малозаметных объектов и работы в условиях недостаточной освещенности необходимо создание систем с переменным CWL, подобных глазу. Подобную адаптацию можно осуществить в приемных устройствах ПЗС-типа не только регулировкой размера входного зрачка, но и соответствующим изменением алгоритмов выполнения процедуры "запись-считывание" сигнала на приемной матрице.

### Заключение

Таким образом, предлагается использовать обобщенное уравнение канала локации для определения взаимозависимых требований к ха-

рактеристикам элементов системы локации с детальным разрешением целей и оценки ее качества в целом.

Как показывает анализ полученного уравнения, развитие систем оптической локации определяется в основном двумя факторами:

применением эффективной лазерной подсветки с оптимальными спектральными и энергетическими характеристиками;

созданием адаптивных фотоприемных устройств с дискретностью, отвечающей дифракционному пределу оптических систем построения изображения.

Тем не менее, в связи с недостаточной экспериментальной проверкой изложенный в настоящей статье материал носит скорее научно-познавательный, нежели научно-методический характер. Прежде чем рекомендовать предложенный подход для решения конкретных задач, необходимо проверить его более досконально. Поэтому автор будет крайне признателен любой возможности дополнительного обсуждения и проверки применимости данного подхода на практике.

### Литература

1. Матвеев И. Н., Протопопов В. В. и др. Лазерная локация. — М.: Машиностроение, 1984.
2. Карельский В. Г. Анализ возможности применения лазерной подсветки с  $\lambda=4$  мкм в системах ИК-наблюдения и оптической локации // Прикладная физика. 2001. № 1. С. 5.
3. Башкин А. С., Безноздрев В. Н., Пирогов Н. А. Особенности прохождения лазерных пучков по наклонным трассам через турбулентную атмосферу. — Химки. Доклады лазерной секции научно-технической конференции НПО "Энергомаш им. акад. В. П. Глушко", 2001. С. 15.
4. Бакуменко В. Л., Сауридов А. Н., Таубкин И. Н. Анализ предельных возможностей идеальных тепловизоров при наблюдении "точечных" излучателей // Тез. докл. на XVI Междунар. науч.-техн. конф. по фотоэлектронике и приборам ночного видения. ГУП «НПО "Орион"». 2000. С. 11.

## Analyse of characteristics of optical radar systems based on the range photodetectors

V. G. Karelskiy

Glushko's Energomash R&D Association, Khimki, Moscow region, Russia

*The problems of the fitting an optic parts in the laser radar systems by use of matrix photodetectors for the fine detections of the targets are discussed. It is given the equation of laser radar for determination of the demands to an illuminating by the different parameters of the reception—transmission and detections of the optic signals and forms a image of the target. The possibility of use this equation for the determination of the characteristics and quality of radars channel with laser illumination.*