

УДК 621.383

## Анализ возможности применения лазерной подсветки с $\lambda \approx 4$ мкм в системах ИК-наблюдения и оптической локации

В. Г. Карельский

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

*Применение мощных многоцветных HF(DF)-лазеров дает возможность подбора длин волн излучения и энергетической освещенности цели, наиболее отвечающих условиям наблюдения и спектральному альбедо цели. В рамках научных исследований, проводимых под эгидой федеральной космической программы России, рассмотрены возможности наблюдения и локации целей через атмосферу при их подсветке с помощью DF-лазеров, размещаемых на спутнике. Лазерная подсветка позволит, по расчетам, осуществлять локацию и подсветку в приземном слое атмосферы и на поверхности Земли в условиях ограниченной видимости: ночью, через туман, дым или мглу. Получены расчетные требования к лазерной подсветке для различных условий и вариантов построения комплекса приемопередающей аппаратуры, включая однопозиционный и двухпозиционный варианты.*

До настоящего времени для получения видеоинформации наиболее активно используются две спектральные области: видимый диапазон и область тепловизии (8—14 мкм), в которых реализуются пассивные и активные методы наблюдения. Однако работа приемной аппаратуры в этих диапазонах спектра часто затруднена. В частности, излучение видимого диапазона сильно рассеивается на атмосферных аэрозолях, а тепловизионный диапазон характеризуется высоким уровнем шумов и низким разрешением. В промежуточной области спектра влияние помехообразующих факторов значительно меньше [1], но для работы в ней требуются активные методы наблюдения и высокочувствительные фотоприемные устройства, которые еще не получили достаточного развития. В связи с этим диапазон 3—5 мкм используется преимущественно для наблюдения таких специфических целей, как стартующие ракеты или реактивные самолеты.

Разработка активных оптико-электронных систем сталкивается с трудностями создания компактных, мощных и одновременно экономичных источников подсветки с оптимальными спектральными характеристиками. Возможно, это обстоятельство объясняет отсутствие сколько-нибудь значительного прогресса в области лазерной локации за последние годы, что особенно заметно на фоне стремительного развития смежных направлений оптоэлектроники.

Тем не менее, дальнейшее развитие информационных технологий позволяет рассматривать более широкое использование оптической локации, например для мониторинга околоземного пространства, зондирования атмосферы и лазерной спектральной съемки [4]. Ожидается, что внедрение лазерной техники будет способствовать решению подобных задач на основе построения изображений с применением матричных фотоприемников ПЗС-типа.

### Анализ эффективности лазерной подсветки

Сравним методы тепловой пеленгации и оптической локации с учетом различных условий наблюдения. При наблюдении объектов по их тепловому излучению во входной зрачок оптико-электронного приемника (ОЭП) попадает лучистый поток, определяемый уравнением:

$$\partial\Phi_{\Sigma} = T^*SA^2I_{\lambda}\partial\lambda, \quad (1)$$

где  $T^*$  — интегральное ослабление сигнала в канале наблюдения;

$A$  — численная апертура объектива;

$S$  — площадь поверхности наблюдаемого объекта;

$I_{\lambda}$  — спектральная плотность энергетической светимости наблюдаемого объекта в интервале спектра  $\partial\lambda$ , используемом для наблюдения.

После преобразования уравнения (1) с использованием закона Стефана-Больцмана и интегрирования получим уравнение для величины потока в случае серого тела [2]:

$$\Phi_{\Sigma}(\lambda_1 - \lambda_2) = k^2\lambda^2\varepsilon_T\sigma\Delta Z(x)T^*T^4, \quad (2)$$

где  $k$  — численный коэффициент;

$\varepsilon_T$  — излучательная способность объекта;

$Z(x)$  — табулированная функция от  $x = \lambda/\lambda_m$ ;

$T$  — абсолютная температура объекта;

$\lambda_1 - \lambda_2$  — спектральная область наблюдения;

$\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$  Вт·м<sup>-2</sup>·К<sup>-4</sup>.

Чтобы получить среднюю плотность световой мощности в плоскости фотоприемников, разделим правую и левую части уравнения (2) на площадь матрицы:  $NS_i$ , где  $N$  — число элементов изображения и  $S_i$  — площадь, приходящаяся на единичный пиксел. Принимая, что размеры пиксела соответствуют разрешающей способности объектива, т. е.  $\sim\lambda/D$ , получим:

$$I = \frac{\Phi_{\Sigma}(\lambda_1 - \lambda_2)}{NS_i} = KT^*T^4\psi^2, \quad (3)$$

где  $K = k^2\varepsilon_T\sigma\Delta Z(x)/N$ ;

$\psi$  — относительное отверстие приемного объектива.

Уравнение (3) показывает, что облученность матрицы зависит от того, насколько близко находится спектральная область работы ОЭП к максимуму излучательной способности объекта  $\lambda_m$ . При значении  $x = \lambda/\lambda_m = 1/2$  функция  $Z(x)$  уменьшается по сравнению с  $Z(x = 1)$  на два порядка, при  $x = 1/3$  — на четыре порядка и т. д. Напомним, что в нормальных условиях  $\lambda_m \approx 10$  мкм. Естественно, при тепловой пеленгации вблизи  $\lambda_m$  уже на сравнительно небольших дистанциях пропадает световой контраст цели и шумовой фон играет доминирующее значение даже при криогенном охлаждении приемного устройства и подсветке цели СО<sub>2</sub>-лазером [3].

На значительных расстояниях и в условиях ограниченной видимости определяющую роль играет множитель  $T^*$ . В этой связи большой интерес представляет "окно прозрачности" атмосферы в области 3,3—4,2 мкм, в которой наиболее благоприятные условия наблюдения, в том числе снижение уровня шумов и наименьшее ослабление сигнала в атмосфере удачно сочетаются с возможностями ИК-оптики и оптоэлектроники [4]. Известно, например, что в области 4 мкм энергетическая светимость атмосферы Земли даже при подсветке ее Солнцем на порядок ниже, чем в области 10 мкм [1].

Светимость наблюдаемых объектов в средней ИК-области спектра и световой контраст изображения усиливаются при использовании лазерной подсветки. При этом контраст изображения определяется не эмиссионными свойствами области наблюдения, а флуктуациями освещенности, спектрального альbedo-цели и уровня фона. Как известно, альbedo зависит от длины волны, состояния рассеивающей поверхности, ее химического состава, шероховатости и пр. Дополнительная подсветка значительно расширяет возможности обнаружения и распознавания целей. Однако применение активных методов локации в условиях недостаточной видимости и на больших дистанциях (~10 км и более) потребует потоков исключительно высокой яркости с оптимальными спектральными характеристиками. Распространенные на сегодняшний день типы лазеров обеспечить эти требования не могут, поэтому дальность действия существующих лазерных локаторов и лидеров в значительной степени зависит от состояния атмосферы и обычно ограничивается 1—3 км [3]. Применению в переносных и мобильных системах локации и ИК-наблюдения более мощных лазерных источников препятствуют массогабаритные, ресурсные ограничения и демаскирующие факторы. Изменить ситуацию можно при использовании двухпозиционной схемы. Например, расположение достаточно мощного лазера подсветки на самолете или спутнике автоматически снимает проблемы, связанные с получением и доставкой излучения в зону наблюдения. При определенной синхронизации работы системы можно обеспечивать одновременный прием отраженного от цели сигнала на несколько ОЭП различного типа. В этом случае при ограниченной прозрачности атмосферы могут быть использованы химические лазеры непрерывного или импульсного типа на молекулах DF (DF-НХЛ и DF-ИХЛ, соответственно), излучающие в диапазоне спектра 3,6—4,1 мкм. Эти лазеры обладают высокой энергетической эффективностью, компактностью и оптимальными спектральными характеристиками [4 и 5].

Источник подсветки, освещающий объект на расстоянии  $L_i$  с силой излучения  $I_э$ , создает облученность пиксела приемной матрицы, определяемую уравнением, аналогичным (3):

$$I'_n = \left( \frac{\tau_a I_э}{L_i^2} \right) A(\lambda) T^* \psi^2, \quad (4)$$

где  $\tau_a$  — пропускание излучения подсветки атмосферой;

$A(\lambda)$  — спектральное альbedo проецируемого на фотоприемник участка поверхности объекта.

Уравнение (4) получено для условий, когда угловые размеры наблюдаемого объекта превышают предел разрешения приемного устройства, причем изображение объекта проецируется на участок матрицы, содержащей  $2 \times 2$  пикселей и более. Дифракция и корреляционные факторы не учитывались.

Из сопоставления плотностей сигнала, полученных с помощью уравнений (3) и (4), формулируется условие эффективности лазерной подсветки:  $I'_n/I_n \gg 1$ . Другим условием, обуславливающим целесообразность применения лазерной подсветки, является выполнение неравенства  $I'_n/S_i > P_{\min}$  при  $I_n/S_i < P_{\min}$ , где  $P_{\min}$  — минимальное значение обнаруживаемой мощности локационного сигнала при заданном отношении “сигнал/шум”. Например, в случае использования ПЗС-матрицы на фотоприемниках из SiPt [6] можно ориентировочно принять значение  $P_{\min} = 10^{-12}$  Вт/пиксел, следовательно, пороговая облученность при  $S_i \approx 2 \cdot 10^{-5}$  см<sup>2</sup> составит  $\sim 5 \cdot 10^{-8}$  Вт/см<sup>2</sup>.

При  $A(\lambda) \approx 0,3$ ,  $T \sim 300$  К и удовлетворительной прозрачности атмосферы необходимые для эффективной локации условия реализуются при подсветке, обеспечивающей  $I_n/L_1^2 > 10$  Вт/(м<sup>2</sup>·ср). Такой яркостью обладает DF-НХЛ мощностью 20—30 кВт с расходимостью  $\sim 10^{-4}$  рад, расположенный на низкоорбитальном спутнике, при расстоянии до цели  $\sim 400$  км. Возможности реализации такого решения рассматривались в обзоре [4].

Требования к подсветке, естественно, возрастают по мере ухудшения условий наблюдения. Зависимость этих требований от интегрального ослабления сигнала и характеристик приемного устройства определяется из соотношений, обычно применяемых в оптике, локации и фотоэлектронике. Для тех же условий, которые оговаривались при выводе уравнения (4), можно получить следующее уравнение канала локации:

$$\frac{I_0}{L_1^2} \approx \frac{1}{A(\lambda)T^* \lambda} \frac{u_c / u_{\text{ш}} \sqrt{f}}{D^*} \frac{1}{\psi}, \quad (5)$$

где  $u_c/u_{\text{ш}}$  — отношение “сигнал/шум”;

$D^*$  — обнаружительная способность фотоприемника;

$f$  — полоса пропускания приемного тракта. Величина  $T^*$  в (5) объединяет все виды потерь, включая  $\tau_a$ .

В целях упрощения анализа все характеристики в уравнении (5) сгруппированы в четырех параметрах: освещенности (в левой части), условия наблюдения, детектирования и фокусировки (в правой части, по порядку). Само уравнение является балансовым, причем дальность локации учитывается только в величине  $T^*$ .

### Результаты расчета

Возможности активных систем наблюдения и локации наиболее полно реализуются при использовании аэрокосмических средств, которые обеспечивают оперативное получение видеоинформации, в том числе из труднодоступных районов. Рассмотрим два варианта построения систем с лазерной подсветкой: однопозиционный (рис. 1, а) и двухпозиционный (рис. 1, б). В первом случае локатор располагается вместе с лазером подсветки на спутнике  $S$ . Вторая схема предусматривает расположение лазера на спутнике, а локатора на другом носителе, например на самолете [7].

Численные оценки показывают, что в однопозиционной схеме предпочтительно использование импульсной подсветки, поскольку в этом случае требуется яркость излучения, которую чрезвычайно сложно реализовать в непрерывном режиме.

Зависимости требований к яркости подсветки с  $\lambda = 4$  мкм в однопозиционной схеме от условий наблюдения и относительного отверстия приемного объектива показаны на рис. 2. Параметр детектирования принимался  $\sim 10^{-5}$  В<sup>-1</sup>·м.

Учитывая, что яркость подсветки в существующих моделях DF-НХЛ может достигать  $10^{16}$ — $10^{19}$  Вт/ср, расстояние от лазера до наблюдаемого объекта, рассчитанное по формуле (5), составит до  $\sim 10$  тыс. км, что соответствует расположению спутника с лазером и приемной аппаратурой на эллиптической орбите. Благодаря высокой яркости подсветки в импульсном режиме, ослабление сигнала, по расчетам, может составлять 50 дБ и более.

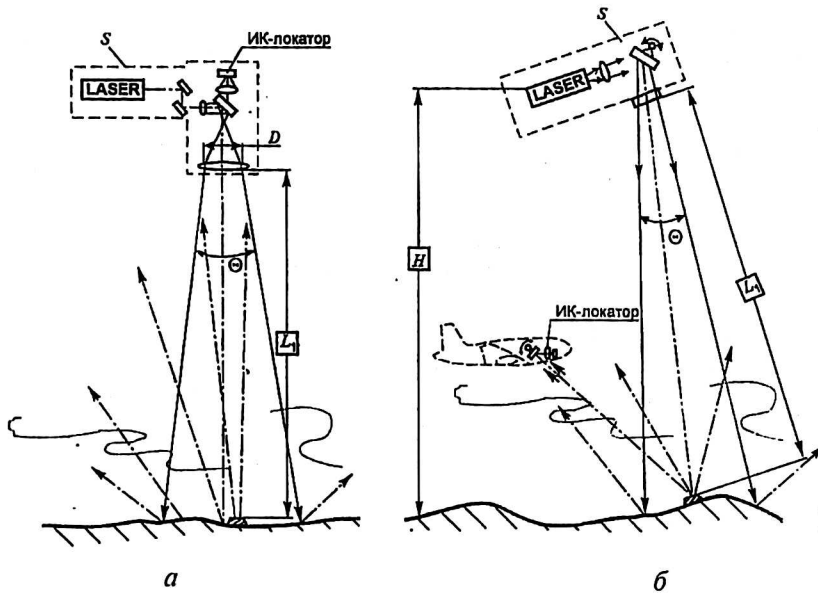


Рис. 1. Схема построения системы локации: а — однопозиционная; б — двухпозиционная

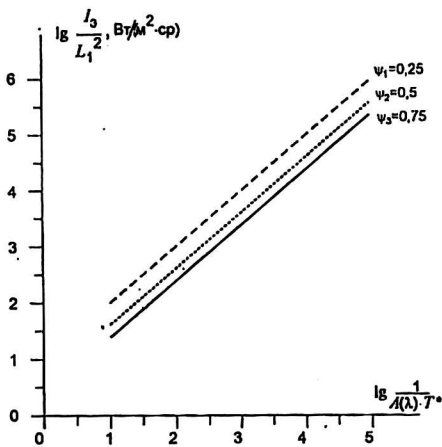


Рис. 2. Зависимость требований к яркости подсветки от потерь энергии сигнала при различных значениях относительного отверстия объектива в однопозиционной схеме (импульсный режим)

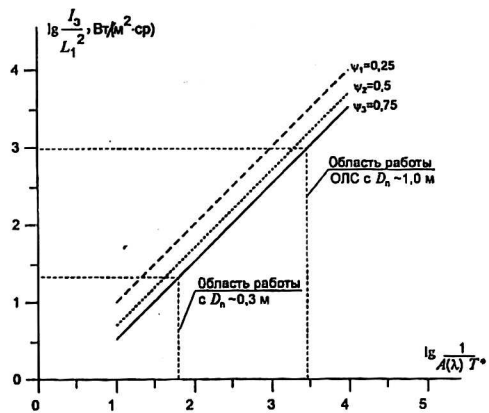


Рис. 3. Зависимость требований к яркости подсветки от потерь энергии сигнала при различных значениях относительного отверстия объектива в двухпозиционной схеме (непрерывный режим)

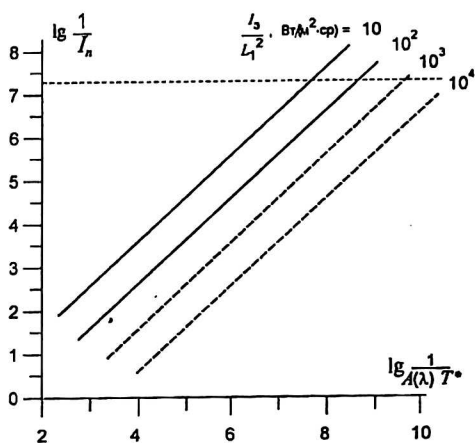
При подсветке с помощью DF-НХЛ можно получить видеоинформацию в реальном масштабе времени, но только в двухпозиционной схеме (см. рис. 1, б). Зависимость требований к яркости подсветки в этой схеме от условий наблюдения и приема сигналов при различных значениях относительного отверстия объектива показана на рис. 3. Параметр детектирования в этом случае принимался  $\sim 10^{-6}$  Вт $^{-1}$ ·м с учетом снижения частотных характеристик канала и возможностей накопления сигнала.

Применение подобной схемы подсветки можно проиллюстрировать следующим примером [7]. При 3-бальной прозрачности атмосферы, что соответ-

ствуется визуальной видимости  $\sim 1$  км, дальность работы ИК-приборов наблюдения может быть увеличена до  $\sim 4-5$  км за счет подсветки DF-НХЛ со средней мощностью 20—30 кВт, расположенного на орбите высотой в несколько тысяч километров. При этом уровень естественной освещенности и собственная светимость цели не играют никакой роли. Получение максимальной яркости подсветки, отвечающей потерям излучения в атмосфере, обеспечивается за счет увеличения размера излучающей апертуры,  $D_n$ . На рис. 3 показаны области работы при двух значениях  $D_n$  — 0,3 и 1,0 м. Работа подобной системы требует четкой синхронизации режимов сканирования, модуляции и кадровой развертки.

На рис. 4 приведены полученные из уравнения (4) зависимости интенсивности принимаемого сигнала от интегральных потерь при различных яркости и режимах подсветки. На графике отмечено пороговое значение сигнала, соответствующее чувствительности фотоприемников на SiPt. Относительное отверстие объектива принималось  $\sim 1:2$ , яркость подсветки варьировалась в пределах, соответствующих существующим моделям DF-НХЛ и DF-НХЛ при различных значениях излучающей апертуры (0,3—1,0 м).

*Рис. 4. Зависимость облученности пиксела от потерь энергии сигнала при различной яркости подсветки в непрерывном (сплошные линии) и импульсном (пунктирные линии) режимах*



### Обсуждение результатов расчета

Приведенный анализ весьма схематичен и не позволяет сделать выводы о потенциальных характеристиках системы в целом. В то же время результаты расчета свидетельствуют о перспективности комплексирования существующих образцов ОЭП и лазерной техники.

Примечательно, что в используемых для анализа уравнениях (3)—(5) отсутствует размер входной апертуры объектива. Этот размер определяет только выбор приемной матрицы и разрешающую способность ОЭП. Таким образом, представленные результаты могут быть отнесены к приборам различного класса и типоразмера.

Дальность лазерной локации, как следует из уравнения (5), примерно пропорциональна силе излучения, относительному отверстию приемного объектива и зависит, прежде всего, от потерь излучения в атмосфере и оптических трактах. В действительности дальность локации будет определяться не только характеристиками канала, но и эффективностью подавления разного рода помех, в том числе вызванных самой подсветкой.

Уравнения (3) и (4) показывают, что облученность элементов фотоприемной матрицы также напрямую не зависит от длины волны и связана с расстоянием до цели только через множитель  $T^*$ . В то же время влияние длины волны подсветки на множители в правой части этих уравнений очевидно. По этим и другим причинам связь между спектральным составом подсветки и характеристиками системы имеет существенно более сложный характер, причем в условиях плохой видимости область 3,5—4 мкм представляется наиболее оптимальной.

Наряду с этой спектральной областью большую привлекательность во многих условиях имеет излучение с  $\lambda \approx 1,06$  мкм. Такая подсветка имеет более высокие потери на рассеяние и поглощение в атмосфере, но это компенсируется большей чувствительностью фотоприемников, высоким разрешением и технологическими преимуществами приемной и передающей оптики. Сопоставление различных спектральных диапазонов и источников лазерной подсветки будет представлено в последующих публикациях.

Рамки настоящей статьи не позволяют привести анализ возможностей, которые дает обработка пространственно-временных и фазовых характеристик локационного сигнала. Определенный интерес представляют возможности подавления помехи обратного рассеяния и получение "тонких срезов" изображения по глубине.

При выборе подсветки необходимо учитывать, что излучение газовых лазеров, в том числе и DF-лазеров, отличается высоким оптическим качеством и когерентностью. Положительную роль играет также отсутствие спектральной структуры в зоне, освещаемой многоцветным DF-лазером. Кроме того, лазерное излучение с  $\lambda \sim 4$  мкм более безопасно для глаз по сравнению с излучением видимого и ближнего ИК-диапазонов [8].

### Выводы

В результате выполненного анализа эффективности лазерной подсветки в системах локации и наблюдения для среднего ИК-диапазона показаны возможности использования подсветки с помощью DF-химических лазеров, размещаемых на спутнике или самолете. Спектр излучения этих лазеров попадает в оптимальную область работы ИК-приборов и обеспечивает наилучшие условия приема и обработки эхосигнала в условиях ограниченной видимости. Применение лазерной подсветки наиболее оправдано в условиях, когда невозможно осуществление визуального контроля, затруднена тепловая пеленгация целей или требуется работа на предельных дистанциях. Подсветка может осуществляться DF-лазерами импульсного или непрерывного типа с использованием одно- и двухпозиционных схем построения системы локации.

Выполненный в ходе расчетов анализ отражает одну из тенденций развития видеоинформационных технологий в направлении создания гиперспектральных методов с широким применением аэрокосмических средств и лазерной техники. Представляется, что наибольшей эффективностью и исключительными возможностями будет обладать оптико-электронная система, которая является работоспособной в любых метеусловиях за счет обработки и синтеза изображений в характерных областях спектра оптических частот и СВЧ-диапазона. Архитектура такой системы может быть реализована на современной элементной базе с комплексированием авиационных, космических и наземных компонент.

## Л и т е р а т у р а

1. Лазарев Л. П. Оптико-электрические приборы наведения. — М.: Машиностроение, 1989.
2. Турыгин И. А. Прикладная оптика. — М.: Машиностроение, 1965.
3. Протопопов В. В., Устинов Н. Д. Инфракрасные лазерные локационные системы. — М.: Восниздат, 1987.
4. Карельский В. Г. и др. Исследование возможностей создания и применения спутниковых энергоустановок многоцелевого назначения на основе химических лазеров: Аналитический обзор. Деп. ВИМИ. № ДО-8849, 2000.
5. Agroskin V. Ya., Vasiliev G. K., Guriev V. I., Zhitov A. N. Multichannel lokal and remote control of atmospheric gas and aerosol contaminations by HF(DF)-laser radiation lines. BRAS Physics//Supplement Physics of Vibrations. 1996. V. 60. № 2. P. 122—126.
6. Вишнеvский Г. И. и др. Матричные ИК ПЗС с диодами Шоттки на PtSi и тепловизионные системы на их основе: Тез. докл. 16-й Междунар. конф. по фотоэлектронике и приборам ночного видения. М., 2000. С. 13—14.
7. Карельский В. Г. Возможности использования химических лазеров в спутниковых системах лазерной локации и подсветки: Тез. докл. 16-й Международ. конф. по фотоэлектронике и приборам ночного видения. М., 2000. С. 90—91.
8. Справочник по лазерной технике/Пер. с нем.— М.: Энергоатомиздат, 1991.

## Analys of possibilities using lasers illumination witch $\lambda \approx 4 \mu\text{m}$ in systems of IR-observation and optical location

V. G. Karelskiy

NPO "Energomash named after Glushko", Chimki, Moscow region, Russia

*Application of powerful multicoloured HF (DF)-lasers gives the possibility to select radiation wavelengths and energetic illumination extremely meeting the observation conditions and target spectral albedo. Within scientific researches carried out under the aegis of the federal space program of Russia possibilities of observation and location of targets through atmospheric at thier illumination by DF-chemical lasers placed on the satellite were discussed. Laser illumination will allow, according to calculations, to realize location and illumination in the near-earth atmosphere and on the earth surface in limited visibility: at night, through the fog, smoke or haze. Calculated requirements to an illuminating laser for different conditions and variants of building transceiver systems including one-position and two-position ones were obtained.*