

УДК 551.501

В. И. Козинцев, М. Л. Белов,
В. А. Городничев, С. А. Скобьяков,
О. А. Смирнова, Ю. В. Федотов

ДИСТАНЦИОННЫЙ ЛАЗЕРНЫЙ МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ ТОЛЩИНЫ ПЛЕНОК НЕФТЕПРОДУКТОВ НА ВОДНОЙ ПОВЕРХНОСТИ, ОСНОВАННЫЙ НА ОПРЕДЕЛЕНИИ КОЭФФИЦИЕНТА ПРОПУСКАНИЯ ПЛЕНКИ

Рассмотрен дистанционный метод измерения толщины нефтяных пленок на морской поверхности. Показано, что разработанный трехволновой лазерный метод, основанный на определении коэффициента пропускания пленки нефти, позволяет дистанционно измерить толщину пленок нефтепродуктов в диапазоне 4...100 мкм на взволнованной морской поверхности с погрешностью не более 30%.

На сегодняшний день наиболее эффективными для дистанционно-го измерения толщины пленок нефтепродуктов на водной поверхности с авиационных носителей являются лазерные флуоресцентные методы и фотометрические методы на основе использования перестраиваемого по длине волны излучения лазерного источника [1–3].

Важными преимуществами фотометрических методов являются относительная простота аппаратуры и, следовательно, ее относительно низкая стоимость. Однако недостатком этих методов является необходимость проведения многоспектральных измерений, при использовании нескольких десятков спектральных каналов. Поэтому перспективным является разработка новых фотометрических методов, таких, чтобы проведение измерений толщины пленок нефтепродуктов на водной поверхности было возможным с использованием только нескольких длин волн зондирования.

Будем считать, что лазерный локатор расположен на авиационном носителе и облучает морскую поверхность в надир (вертикально вниз).

В работах [2, 3] было показано, что формула для мощности $P(\lambda)$, принимаемой лазерным локатором на длине волны излучения λ , имеет вид (при умеренной скорости приводного ветра, когда на морской поверхности отсутствуют пенные образования)

$$P(\lambda) = A(\lambda)R_{ref}(\lambda, d), \quad (1)$$

где $R_{ref}(\lambda, d)$ — коэффициент отражения от невозмущенной волнением морской поверхности (чистой морской поверхности или покрытой пленкой нефти); λ — длина волны зондирующего излучения; d — толщина пленки нефтепродукта на водной поверхности; $A(\lambda)$ — величина, зависящая от параметров лазерного источника излучения, приемной системы локатора, их диаграмм направленности, пропускания атмосферы на трассе “лазерный локатор — морская поверхность”, неровностей зондируемой морской поверхности и слабо (по сравнению с множителем $R_{ref}(\lambda, d)$) изменяющаяся с изменением длины волны излучения.

Формула (1) справедлива как при непрерывном, так и при импульсном облучении морской поверхности.

При вертикальном падении излучения для $R_{ref}(\lambda, d)$ имеем

$$R_{ref}(\lambda, d) \cong \frac{r_{12}^2 + r_{23}^2 T^2(\lambda) + 2r_{12}r_{23}T(\lambda) \cos[2\beta(\lambda, d)]}{1 + r_{12}^2 r_{23}^2 T^2(\lambda) + 2r_{12}r_{23}T(\lambda) \cos[2\beta(\lambda, d)]}, \quad (2)$$

где

$$T = \exp\left(-\frac{4\pi k_2(\lambda)d}{\lambda}\right); \quad (3)$$

$$r_{12} = \sqrt{\frac{(1 - n_2(\lambda))^2 + k_2^2(\lambda)}{(1 + n_2(\lambda))^2 + k_2^2(\lambda)}}; \quad \beta(\lambda, d) = \frac{2\pi d}{\lambda} n_2(\lambda);$$

$$r_{23} = \sqrt{\frac{(n_2(\lambda) - n_3(\lambda))^2 + (k_2(\lambda) - k_3(\lambda))^2}{(n_2(\lambda) + n_3(\lambda))^2 + (k_2(\lambda) + k_3(\lambda))^2}};$$

$n_{2,3}(\lambda), k_{2,3}(\lambda)$ — показатели преломления и поглощения нефти и воды соответственно; r_{12}, r_{23} — коэффициенты отражения на границе сред “воздух–нефть” и “нефть–вода” соответственно; $T(\lambda)$ — пропускание пленки нефти.

Пусть поглощение в пленке существенно (пропускание пленки для длин волн зондирования заметно отличается от 1).

Покажем, что в этом случае, используя две основные λ_1 и λ_2 и одну вспомогательную λ_3 длины волн зондирования, можно измерить коэффициент пропускания пленки нефти $T(\lambda)$ и определить толщину пленки при известном показателе поглощения нефтепродукта $k_2(\lambda)$.

При измерении толщины пленок нефтепродуктов лазерный локатор (импульсный или непрерывный) облучает морскую поверхность вертикально вниз. Зондирующее лазерное излучение (на длинах волн зондирования λ_1, λ_3 и λ_2) отражается от исследуемого участка морской поверхности.

Мощности эхо-сигналов $P(\lambda_1)$ и $P(\lambda_2)$, регистрируемые фотоприемником лазерного локатора от взволнованной морской поверхности

при зондировании в надир на двух основных длинах волн λ_1 и λ_2 , в соответствии с уравнением (1) равны (для упрощения описания метода считаем, что длительности зондирующих импульсов и расходимость излучения локатора одинаковы для всех длин волн зондирования; если это не так, то различия могут быть учтены при обработке принимаемых лазерных локационных сигналов):

$$\begin{aligned} P(\lambda_1) &= A(\lambda_1)R_{ref}(\lambda_1, d); \\ P(\lambda_2) &= A(\lambda_2)R_{ref}(\lambda_2, d). \end{aligned} \quad (4)$$

Сигналы $P(\lambda_1)$, $P(\lambda_2)$ с фотоприемника поступают в блок обработки, где они сначала нормируются на мощности $P_s(\lambda_1)$, $P_s(\lambda_2)$, излучаемые источником лазерного локатора на длинах волн λ_1 , λ_2 (этим устраняются ошибки, связанные со случайными изменениями мощности лазерных источников):

$$\begin{aligned} \tilde{P}(\lambda_1) &= \frac{P(\lambda_1)}{P_s(\lambda_1)}; \\ \tilde{P}(\lambda_2) &= \frac{P(\lambda_2)}{P_s(\lambda_2)}. \end{aligned} \quad (5)$$

Далее, для устранения неопределенности, связанной с величинами множителей $A(\lambda_{1,2})$, осуществляется нормирование сигналов $\tilde{P}(\lambda_1)$, $\tilde{P}(\lambda_2)$ на величину $\tilde{P}(\lambda_3) = \frac{P(\lambda_3)}{P_s(\lambda_3)}$. Вспомогательную длину волны зондирования λ_3 выбирают, например, равной длине волны максимума поглощения нефтепродукта (из данных, приведенных в работе [4] для нефти $\lambda_3 \cong 3,41$ мкм). При этом из-за большого поглощения нефти (т.е. малости T) на длине волны λ_3 для $R_{ref}(\lambda_3, d)$ при толщинах пленок больше 4...5 мкм имеем

$$R_{ref}(\lambda_3, d) \approx r_{12}^2(\lambda_3). \quad (6)$$

Таким образом, после второй нормировки сигналов получим

$$\begin{aligned} \tilde{\tilde{P}}(\lambda_1) &= \frac{\tilde{P}(\lambda_1)}{\tilde{P}(\lambda_3)}; \\ \tilde{\tilde{P}}(\lambda_2) &= \frac{\tilde{P}(\lambda_2)}{\tilde{P}(\lambda_3)}. \end{aligned} \quad (7)$$

Сигналы $\tilde{\tilde{P}}(\lambda_1)$, $\tilde{\tilde{P}}(\lambda_2)$ зависят только от коэффициентов отражения R_{ref} на длинах волн зондирования λ_1 , λ_2 и λ_3 и коэффициентов пропускания земной атмосферы на этих длинах волн для трассы “лазерный локатор–морская поверхность”.

Проведем коррекцию влияния на сигналы $\tilde{P}(\lambda_1)$, $\tilde{P}(\lambda_2)$ пропускания земной атмосферы на трассе “лазерный локатор–морская поверхность–лазерный локатор”. Это можно сделать, например, используя данные измерений предварительного (до проведения измерений на исследуемой акватории) полета над заведомо чистой морской поверхностью.

В результате этой коррекции сигналы $\tilde{P}(\lambda_1)$, $\tilde{P}(\lambda_2)$ преобразуются в сигналы $\tilde{\tilde{P}}(\lambda_1)$, $\tilde{\tilde{P}}(\lambda_2)$, зависящие только от коэффициентов отражения R_{ref} на длинах волн зондирования λ_1 , λ_2 и λ_3 :

$$\begin{aligned}\tilde{\tilde{P}}(\lambda_1) &= \frac{R_{ref}(\lambda_1, d)}{r_{12}^2(\lambda_1)}; \\ \tilde{\tilde{P}}(\lambda_2) &= \frac{R_{ref}(\lambda_2, d)}{r_{12}^2(\lambda_2)}\end{aligned}\quad (8)$$

или

$$\begin{aligned}\tilde{\tilde{P}}(\lambda_1)r_{12}^2(\lambda_1) &\cong \\ &\cong \frac{r_{12}^2(\lambda_1) + r_{23}^2(\lambda_1)T^2(\lambda_1) + 2r_{12}(\lambda_1)r_{23}(\lambda_1)T(\lambda_1)\cos\left[\frac{4\pi n_2(\lambda_1)d}{\lambda_1}\right]}{1 + r_{12}^2(\lambda_1)r_{23}^2(\lambda_1)T^2(\lambda_1) + 2r_{12}(\lambda_1)r_{23}(\lambda_1)T(\lambda_1)\cos\left[\frac{4\pi n_2(\lambda_1)d}{\lambda_1}\right]}; \\ \tilde{\tilde{P}}(\lambda_2)r_{12}^2(\lambda_2) &\cong \\ &\cong \frac{r_{12}^2(\lambda_2) + r_{23}^2(\lambda_2)T^2(\lambda_2) + 2r_{12}(\lambda_2)r_{23}(\lambda_2)T(\lambda_2)\cos\left[\frac{4\pi n_2(\lambda_2)d}{\lambda_2}\right]}{1 + r_{12}^2(\lambda_2)r_{23}^2(\lambda_2)T^2(\lambda_2) + 2r_{12}(\lambda_2)r_{23}(\lambda_2)T(\lambda_2)\cos\left[\frac{4\pi n_2(\lambda_2)d}{\lambda_2}\right]}.\end{aligned}\quad (9)$$

Система уравнений (9) в принципе содержит всего одну неизвестную величину (толщину пленки нефтепродукта d), но из-за того, что d входит в тригонометрические функции, толщину пленки однозначно определить не удастся. Однако система уравнений (9) позволяет исключить тригонометрические функции, если основные длины волн зондирования λ_1 и λ_2 выбрать следующим образом:

– λ_1 и λ_2 выбираем в спектральном диапазоне, где коэффициент поглощения нефти небольшой, например, в диапазоне 1...2,86 мкм, где коэффициент поглощения нефти остается постоянным и равным $0,004 \text{ м}^{-1}$;

– выбираем λ_1 и λ_2 так, чтобы $2\varphi_1 = \varphi_2$, где $\varphi_1 = \frac{4\pi n_2(\lambda_1)d}{\lambda_1}$,
 $\varphi_2 = \frac{4\pi n_2(\lambda_2)d}{\lambda_2}$. При выполнении этого условия имеем

$$\cos\left[\frac{4\pi n_2(\lambda_2)d}{\lambda_2}\right] = \cos\left[2\frac{4\pi n_2(\lambda_1)d}{\lambda_1}\right] = 2\cos^2\left[\frac{4\pi n_2(\lambda_1)d}{\lambda_1}\right] - 1. \quad (10)$$

Используя соотношение (10) и исключая тригонометрические функции из выражения (9), получим

$$\frac{\tilde{\tilde{P}}(\lambda_2)r_{12}^2(\lambda_2)A - r_{12}^2(\lambda_2) - r_{23}^2(\lambda_2)T^2 + 2r_{12}(\lambda_2)r_{23}(\lambda_2)T}{\{\tilde{\tilde{P}}(\lambda_1)r_{12}^2(\lambda_1)[1 + r_{12}^2(\lambda_1)r_{23}^2(\lambda_1)T^w] - r_{12}^2(\lambda_1) - r_{23}^2(\lambda_1)T^w\}^2} =$$

$$= \frac{r_{12}(\lambda_2)r_{23}(\lambda_2)[1 - \tilde{\tilde{P}}(\lambda_2)r_{12}^2(\lambda_2)]}{r_{12}^2(\lambda_1)r_{23}^2(\lambda_1)[1 - \tilde{\tilde{P}}(\lambda_1)r_{12}^2(\lambda_1)]^2} T^{1-w}, \quad (11)$$

где $A = 1 + r_{12}^2(\lambda_2)r_{23}^2(\lambda_2)T^2 - 2r_{12}(\lambda_2)r_{23}(\lambda_2)T$; $w = \frac{k_2(\lambda_1)n_2(\lambda_2)}{k_2(\lambda_2)n_2(\lambda_1)}$;
 $T = T(\lambda_2) = \exp\left(-\frac{4\pi k_2(\lambda_2)d}{\lambda_2}\right)$.

Таким образом, в соотношение (11) входит только одна (и не тригонометрическая) функция, зависящая от толщины пленки нефтепродукта d , $-T(\lambda_2)$ – пропускание пленки нефти на длине волны λ_2 . Найдя (одним из численных методов) из соотношения (11) величину $T(\lambda_2)$, можно однозначно определить толщину пленки нефтепродукта d .

Отметим, что при обосновании разработанного метода для простоты описания было использовано условие (6), справедливое при толщинах пленок больше 4...5 мкм. Однако им можно не пользоваться, а для нормировки использовать общую формулу для $R_{ref}(\lambda_3, d)$.

Аналогичный (описанным выше процедурам, основанным на использовании аналитических формул) численный алгоритм определения d основан на поиске минимума невязки:

$$\left\{ \left[\tilde{\tilde{P}}(\lambda_1) - \tilde{\tilde{P}}(\lambda_1, d)_{\text{mod}} \right]^2 + \left[\tilde{\tilde{P}}(\lambda_2) - \tilde{\tilde{P}}(\lambda_2, d)_{\text{mod}} \right]^2 \right\}^{1/2}, \quad (12)$$

где $\tilde{\tilde{P}}(\lambda_{1,2})$ – нормированные величины, определяемые из данных измерений на длинах волн зондирования $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$; $\tilde{\tilde{P}}(\lambda_{1,2}, d)_{\text{mod}}$ – модельные значения соответствующих величин, зависящие от толщины пленки d .

Исследование возможностей и границ применимости разработанного метода измерения толщины пленок нефтепродуктов на водной

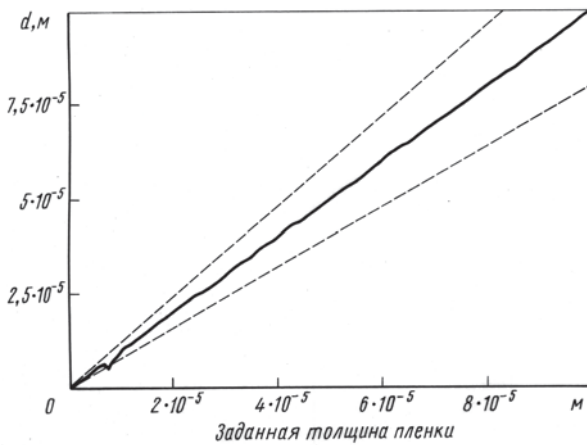


Рис. 1. Результат работы аналитического алгоритма измерения толщины нефтяных пленок в случае отсутствия шума измерения

поверхности проводилось методом математического моделирования в широком диапазоне изменения среднеквадратического относительного значения шума измерения при аналитическом и численном трехволновом алгоритмах определения толщины пленок нефтепродуктов и различных процедурах обработки данных измерений.

На рис. 1 и 2, а, б приведены наиболее характерные результаты математического моделирования для длин волн зондирования λ_1 , λ_2 и λ_3 , выбранных равными соответственно 2,86; 1,43 и 3,41 мкм (длина волны 2,86 мкм соответствует максимуму коэффициента отражения на границе раздела “нефть–вода”; длина волны 1,43 мкм — в 2 раза меньше, чем 2,86 мкм, в соответствии с формулой (10)). Здесь показаны реализации найденного (определенного разработанным алгоритмом) значения толщины пленки d в зависимости от заданного при математическом моделировании (действительного) значения толщины.

На рис. 2, а, б показаны результаты соответственно для аналитического и численного алгоритма. Рис. 1 получен для случая отсутствия шума измерения, а рис. 2, а, б — при относительном среднеквадратическом значении шума измерения, равном 1%. На рисунках прямая тонкая штрих-пунктирная линия — это зависимость, для которой восстановленное значение толщины пленки совпадает с действительным. Прямые тонкие пунктирные линии — 20%-ное отличие от действительного значения. Для численного алгоритма использовались специальные алгоритмы обработки для отбраковки “плохих” (с сильным влиянием шума) данных измерений.

Анализ результатов математического моделирования показывает, что разработанный трехволновой метод позволяет проводить измерения толщины пленок нефтепродуктов с толщинами от 4 до 100 мкм. Средняя погрешность определения толщины пленок (для численного

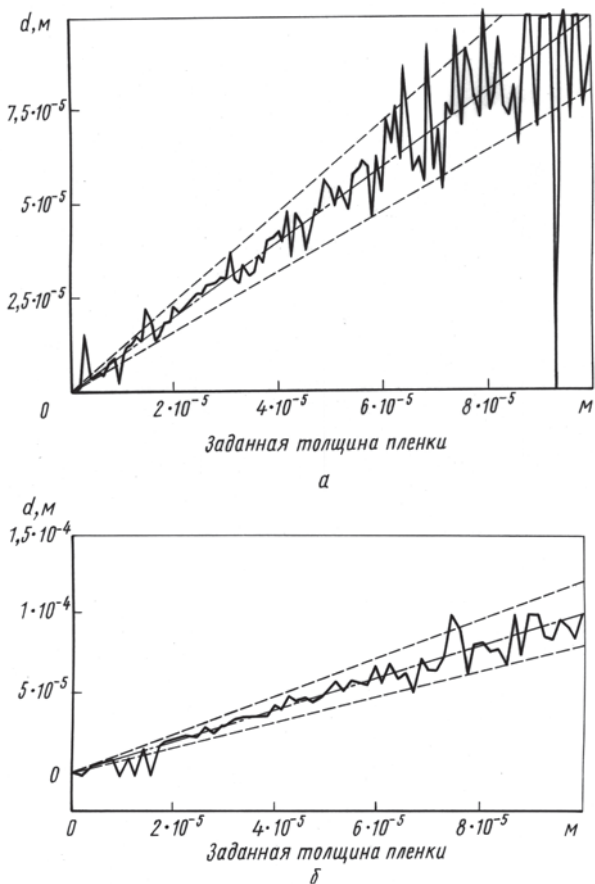


Рис. 2. Результат работы аналитического (а) и численного (б) алгоритмов измерения толщины нефтяных пленок в случае относительного среднеквадратического значения шума измерения, равного 1 %

алгоритма с отбраковкой “плохих” данных измерений) не больше 15 % для толщин 20... 100 мкм и в большинстве случаев не больше 30 % для толщин 4... 20 мкм при относительном среднеквадратическом значении шума измерения, равном 1 %. При толщине пленок меньше 4 мкм погрешность определения толщины хотя и возрастает, однако, в большинстве случаев позволяет судить о порядке толщины пленок.

Таким образом, разработанный трехволновой метод измерения толщины пленок нефтепродуктов, основанный на определении коэффициента пропускания пленки, позволяет определять толщины пленок (4... 100 мкм) нефтепродуктов на водной поверхности с приемлемой для практических целей точностью. Средняя погрешность определения толщины пленок при относительном среднеквадратическом значении шума измерения, равном 1 %, — не больше 15 % для толщин 20... 100 мкм и в большинстве случаев не больше 30 % для толщин 4... 20 мкм.

Работа выполнена при поддержке Международного научно-технического центра (проект № 2437).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Межерис Р. Лазерное дистанционное зондирование. – М.: Мир, 1987. – 550 с.
2. Белов М. Л., Березин С. В., Городничев В. А., Козинцев В. И. Лидарный метод измерения толщины нефтяных пленок нефтепродуктов на взволнованной морской поверхности // Вестник МГТУ. Сер. “Приборостроение”. – 2003. – № 1. – С. 62–69.
3. Белов М. Л., Березин С. В., Городничев В. А., Козинцев В. И. Метод контроля толщины тонких пленок нефтепродуктов на водной поверхности, основанный на использовании лазера с перестраиваемой длиной волны излучения // Оптика атмосферы и океана. – 2002. – Т. 15, № 2. – С. 203–205.
4. Гуревич И. Я., Шифрин К. С. Отражение видимого и ИК-излучения нефтяными пленками на море // Оптические методы изучения океанов и внутренних водоемов. – Новосибирск: Наука, 1979. – С. 166–176.

Статья поступила в редакцию 27.10.2005

Валентин Иванович Козинцев родился в 1945 г., окончил в 1969 г. МВТУ им. Н.Э. Баумана. Д-р техн. наук, зам. директора НИИ “Радиоэлектроника и лазерная техника” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 150 научных работ в области квантовой электроники и экологии.

V.I. Kozintsev (b. 1945) graduated from the Bauman Moscow Higher Technical School in 1969. D. Sc. (Eng.), deputy director of “Radio Electronics and Laser Technology” research institute of the Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 150 publications in the field of quantum electronics and ecology.

Михаил Леонидович Белов родился в 1950 г., окончил в 1973 г. Московский энергетический институт. Д-р техн. наук, ведущий научный сотрудник НИИ “Радиоэлектроника и лазерная техника” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 150 научных работ в области лазерной локации и атмосферной оптики.

M.L. Belov (b. 1950) graduated from Moscow Institute for Power Engineering in 1973. D. Sc. (Eng.), leading researcher of “Radio-electronics and Laser Technology” research institute of the Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 150 publications in the field of the laser location and optics of atmosphere.

Виктор Александрович Городничев родился в 1952 г., окончил в 1976 г. МГУ им. М.В. Ломоносова. Канд. техн. наук, начальник отдела НИИ “Радиоэлектроника и лазерная техника” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 150 научных работ в области лазерной техники.

V.A. Gorodnichev (b. 1952) graduated from Moscow State University n.a.M.V.Lomonosov in 1976. Ph. D. (Eng.), head of the “Radio-electronics and Laser Technology” department research institute of the Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 150 publications in the field of laser technology.

Ольга Алексеевна Смирнова окончила в 1971 г. МВТУ им. Н.Э. Баумана. Канд. техн. наук, доцент кафедры “Радиоэлектронные системы и устройства” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 70 научных работ в области лазерной техники.

O.A. Smirnova graduated from the Bauman Moscow Higher Technical School in 1971. Ph. D. (Eng.), assoc. professor of “Radio Electronic Systems and Devices” department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 70 publications in the field of laser technology.

Юрий Викторович Федотов родился в 1974 г., окончил в 1998 г. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Канд. техн. наук, научный сотрудник НИИ “Радиоэлектроника и лазерная техника” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 20 научных работ в области лазерной техники.

Yu.V. Fedotov (b. 1974) graduated from the Bauman Moscow State Technical University in 1998. Ph. D. (Eng.), researcher of “Radio-electronics and Laser Technology” research institute of the Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 20 publications in the field of laser technology.

Сергей Александрович Скобяков родился в 1974 г., окончил в 1998 г. МГТУ им. Н.Э. Баумана, инженер НИИ РЛ МГТУ им. Н.Э. Баумана.

S.A. Skobyakov (b. 1974) graduated from the Bauman Moscow State Technical University in 1998. Engineer of “Radio-electronics and Laser Technology” research institute of the Bauman Moscow State Technical University.

УДК 681.73

В. В. К р ы ж а н о в с к и й, В. Л. Л е в ш и н

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК СКАНИРУЮЩИХ СУБМАТРИЧНЫХ ТЕПЛОПЕЛЕНГАТОРОВ

Введены понятия потенциала тепlopеленгатора с позиций как приборных характеристик, так и потребительских качеств по контролю доступной области пространства, “двусторонний” критерий оптимизации и сравнения тепlopеленгатора по типу “эффективность–стоимость”. Проанализированы соотношения, связывающие введенные общие критерии с параметрами фоновой обстановки и всеми требуемыми приборными параметрами, позволяющие оценить степень совершенства конкретного тепlopеленгатора по отношению к идеализированному с предельно высокими характеристиками.

Рассмотрим широкообразные тепlopеленгаторы (ТП) с субматричным фотоприемным устройством (ФПУ) [1–4]. Используя обзорные ТП, решают задачи обнаружения и определения угловых координат удаленных (“точечных”) объектов. С этих позиций очевидны такие их важнейшие характеристики как: $\Omega \cong \alpha\beta$ — телесный угол поля обзора; T_k — время его просмотра; α и β — азимутальный и угломестный