

ОЦЕНКА ИНФОРМАТИВНОСТИ ПРИЗНАКОВ ОБЪЕКТОВ В ЗАДАЧАХ ЛАЗЕРНОЙ ЛОКАЦИИ

© 2007 г. **И. А. Непогодин**, доктор физ.-мат. наук

НПО “Государственный институт прикладной оптики”, г. Казань

E-mail: postmaster@gipo.kazan.ru

Проведена оценка информативности ряда характерных структурных признаков самолетов-целей, заключенных в отраженных сигналах, в задачах обнаружения, дальнометрии, наведения и распознавания.

Коды OCIS: 280.3400.

Поступила в редакцию 05.12.2006.

В работе [1] проведен анализ критериев и разработан метод оценки информативности признаков объектов-целей в задачах лазерной локации, включающий описание обобщенной структуры метода и базовой его составляющей – алгоритма математического имитационного моделирования условий локации и характеристик отраженных регистрируемых сигналов, являющихся носителями информационных признаков объектов. В настоящей статье на основе указанной имитационной модели, дополненной алгоритмами выявления рабочих признаков и реализации решающих правил, проведена оценка информативности ряда характерных структурных признаков самолетов-целей, заключенных в отраженных сигналах, в задачах их обнаружения, дальнометрии, наведения и распознавания. Исследование информативности признаков объектов локации в указанных задачах проводилось во взаимосвязи и в обеспечение оптимального (квазиоптимального) формирования зондирующих и приема (обработки) отраженных сигналов.

Оценка информативности нестационарного временного отклика самолетов-целей в задаче обнаружения

Одним из наиболее важных положений оптимального построения систем активной оптической локации квадратичного приема в обеспечение максимальной дальности обнаружения объектов, впервые сформулированных в работе [2], является реализация принципа преобразования энергетического подобия, заключающегося в максимально возможном укорочении длительности импульса зондирующего излучения заданной энергии при соответствующем увеличении его интенсивности в заданных условиях облучения объекта и приема сигнала.

В общем случае эффективность преобразования энергетического подобия в задаче лазерно-локационного обнаружения объектов определяется выражением [3]

$$\eta = \frac{\mu_2 \mu_{n1}}{\mu_1 \mu_{n2}}, \quad (1)$$

где μ_1 и μ_2 – соответственно величины отношений сигнала к шуму для исходного (длительностью τ_{n1}) и преобразованного (длительностью τ_{n2}) импульсов, μ_{n1} и μ_{n2} – соответствующие пороговые величины отношений для исходного и преобразованного импульсов; $\lambda_3 = \tau_{n1}/\tau_{n2}$ – коэффициент преобразования (укорочения) длительности зондирующего импульса.

Потенциальная эффективность преобразования энергетического подобия имеет место для условий стационарного отражения зондирующего импульса излучения от объекта, характеризующегося неискаженной передачей его формы и длительности, и оптимального приема (согласованной фильтрации) регистрируемого сигнала на фоне нормальных шумов равномерного спектра $G(\omega) = G_0$ (“белых” шумов), при этом [3, 4]:

$$\eta = \frac{\mu_2 \mu_{n1}}{\mu_1 \mu_{n2}} = (\lambda_3)^{1/2} \frac{\mu_{n1}}{\mu_{n2}}. \quad (2)$$

Величина отношения μ_{n1}/μ_{n2} при обнаружении сигналов на фоне “белых” шумов с характерными допустимыми нормами ошибок, временем наблюдения сигнала и значением $\lambda_3 \leq 10^3 - 10^4$ достаточно близка к единице.

Факторами, ограничивающими эффективность преобразования подобия в задаче обнаружения объекта, могут служить:

- переход к дискретному распределению (в частности, пуассоновскому) шумов фотоприемного устройства (ФПУ),
- ограничение по постоянной времени ФПУ,
- нестационарное отражение коротких зондирующих импульсов от протяженных объектов, заключающееся в искажении их формы и растягивании длительности.

Анализ влияния первых двух факторов был проведен соответственно в работах [5] и [6], последнего – для случая объектов простой геометрической

формы с диффузным покрытием в работе [6] и для объекта сложной конфигурации, по-видимому, самолета с одним из типов покрытия, в работе [4].

Ниже проведена оценка границ эффективности укорочения длительности зондирующих импульсов заданной энергии в задаче обнаружения самолетов-целей с различными покрытиями (от диффузного до зеркального) и ориентациями (ракурсами), обусловленными их нестационарным откликом (отражением), для условий оптимального и квазиоптимального приема сигналов на фоне “белых” шумов.

Выражения для оценки величин μ , входящих в (1) и (2), для условий оптимального (μ_o) и квазиоптимального ($\mu_{ко}$) приема сигналов на фоне “белых” шумов имеют вид:

$$\mu_o = \left[\frac{2K_0}{G_0} \int_0^\infty |\mathcal{E}(j\omega)|^2 d\omega \right]^{1/2}, \quad (3)$$

$$\mu_{ко} = \frac{\operatorname{Re} \left[\frac{K_0}{\pi} \int_0^\infty \mathcal{E}(j\omega) K(j\omega) e^{j\omega\tau_0} d\omega \right]}{\left[\frac{G_0}{2\pi} \int_0^\infty |K(j\omega)|^2 d\omega \right]^{1/2}}, \quad (4)$$

где $\mathcal{E}(j\omega)$ – спектральная характеристика импульсной эффективной отражающей площади (ЭОП) объекта, $K(j\omega)$ – спектральная передаточная характеристика фильтра, K_0 – постоянная сигнала, τ_0 – момент достижения максимума выходного сигнала [1].

Результаты расчетов зависимостей величин η от коэффициента преобразования $\lambda_3 = \tau_{н1}/\tau_{н2}$, лежащего в интервале $1-10^3$ при $\tau_{н1} = 1000$ нс, для случая отражения излучения от самолетов А-10А (сплошные линии) и МиГ-17 (штриховые линии) с диффузным (АК-512), направленно-рассеивающим (алюминиевая пудра) и зеркальным (ПФ-163 черное) покрытиями, ориентированных под различными курсовыми углами $\varphi_{кc} = 0^\circ$ (а), $\varphi_{кc} = 45^\circ$ (б), $\varphi_{кc} = 90^\circ$ (в), и согласованной фильтрации сигналов представлены на рис. 1. На этом же рисунке штрихпунктирной линией представлена зависимость $\eta(\tau_{н1}/\tau_{н2})$ для случая стационарного отражения излучения от цели, т. е. отражения излучения от “точечной” цели.

Из рис. 1 следует, что при нестационарном отражении зондирующего излучения от самолетов-целей и оптимальном приеме сигналов эффективность преобразования энергетического подобия снижается по сравнению с “точечной” целью тем больше, чем больше протяженность самолета по направлению локации и диффузность рассеивающих свойств ее покрытия; укорочение длительности импульсов

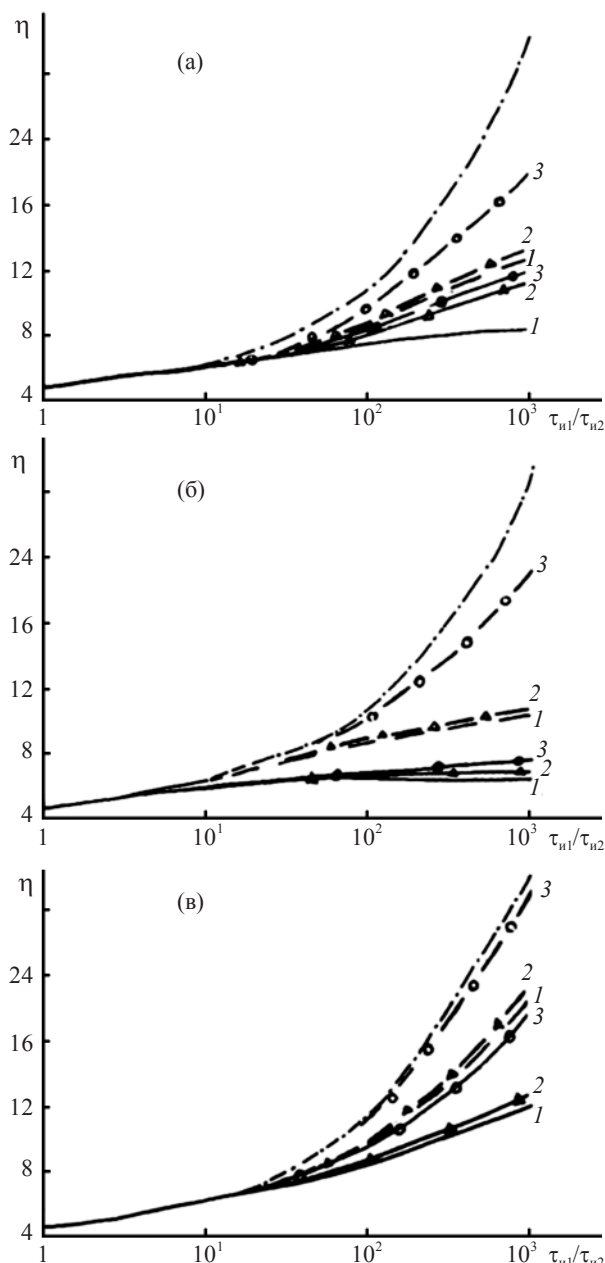


Рис. 1. Зависимости величин η от коэффициентов преобразования $\lambda_3 = \tau_{н1}/\tau_{н2}$ (при $\tau_{н1} = 1000$ нс) для “точечной” цели (штрихпунктирная линия), а также для самолетов А-10А (сплошные линии) и МиГ-17 (штриховые линии) с диффузным (1), направленно-рассеивающим (2) и зеркальным (3) покрытиями, ориентированных под курсовыми углами $\varphi_{кc} = 0^\circ$ (а), $\varphi_{кc} = 45^\circ$ (б), $\varphi_{кc} = 90^\circ$ (в), при согласованной фильтрации сигналов.

зондирующего излучения целесообразно осуществлять: до значений $\tau_{н}^K \approx 0,2T_{об}$ для самолетов с диффузным покрытием, до $\tau_{н}^K \approx 0,15T_{об}$ для самолетов с направленно-рассеивающим покрытием и до $\tau_{н}^K \approx 0,06T_{об}$ для самолетов с зеркальным покрытием, где $T_{об} = 2L_{об}/C$.

Оптимальный фильтр для нестационарно-отраженных сигналов в случае неизвестного типа цели, ее покрытия и ракурса не реализуем. В данном случае можно использовать некоторую многоканальную схему фильтрации, однако это технически сложно. Предпочтительнее использовать одноканальную схему, например, оптимальную для наихудших условий приема или одноканальную с некоторой полосой пропускания, подобранной таким образом, чтобы обеспечить максимальное в среднестатистическом смысле отношение сигнала к шуму, т. е. использовать в том или ином смысле квазиоптимальный фильтр. На рис. 2 представлены результаты расчета зависимостей средних значений $\bar{\mu}$ от постоянной времени τ_ϕ приемного тракта локатора с временной передаточной характеристикой вида $K(t) = \exp(-t/\tau_\phi)$, где $t \geq 0$, для случая облучения равновероятно-ориентированного в 4 π самолета А-10А (с тремя указанными выше покрытиями) им-

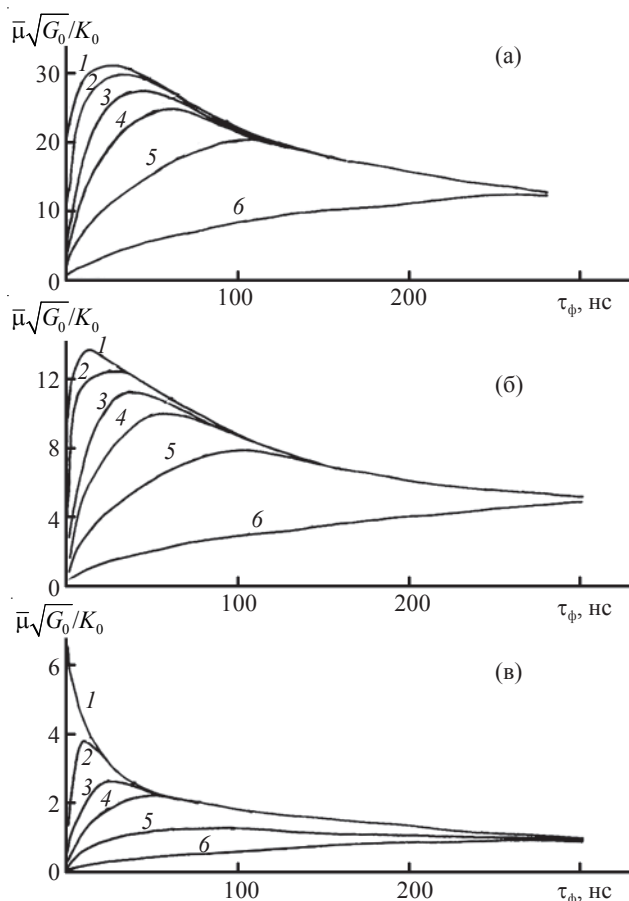


Рис. 2. Зависимости средних значений отношений сигнала к шуму ($\bar{\mu}$) от постоянной времени (τ_ϕ) приемного тракта для случая облучения самолета А-10А с диффузным (а), направленно-рассеивающим (б) и зеркальным (в) покрытиями импульсами длительностью $\tau_n = 1, 10, 30, 50, 100, 300$ нс (кривые 1, 2, 3, 4, 5, 6).

пульсами прямоугольной формы и длительностью $\tau_n = 1, 10, 30, 50, 100, 300$ нс (соответственно кривые 1, 2, 3, 4, 5, 6). Из полученных зависимостей видно, что каждой длительности зондирующего импульса соответствует некоторая постоянная времени τ_ϕ^* , которая позволяет получить максимальное значение $\bar{\mu}$, т. е. осуществить квазиоптимальный прием.

В табл. 1 представлены среднее значение и коэффициенты вариации отношений сигнала к шуму при оптимальном ($\bar{\mu}_o$ и $C_{\mu o}$) и квазиоптимальном ($\bar{\mu}_{ко}$ и $C_{\mu ко}$) приеме отраженных сигналов от равновероятно-ориентированных в 4 π самолетов А-10А и МиГ-17 с диффузным (АК-512), направленно-рассеивающим (алюминиевая пудра) и зеркальным (ПФ-163) покрытиями для зондирующих импульсов длительностью $\tau_n = 1, 5, 10, 30, 50, 100$ и 300 нс и соответствующих этим импульсам значениям τ_ϕ^* для условий квазиоптимального приема.

Из данных табл. 1 следует, что различие между $\bar{\mu}_o$ и $\bar{\mu}_{ко}$ ($\bar{\mu}_o \geq \bar{\mu}_{ко}$) тем больше, чем короче длительность зондирующего импульса, однако оно не превышает 1,42 раза. От габаритов самолета, а также типов его покрытия для тех же τ_n оно практически не зависит. Различие в величинах $C_{\mu o}$ и $C_{\mu ко}$ незначительно.

Оценка информативности нестационарного временного сигнала от самолетов-целей в задаче дальнометрии

В ряде задач локации необходимо иметь высокоточную информацию о дальности до протяженного объекта, в частности до его центра масс. Точность измерения дальности до объекта зависит от точности фиксации временного положения отраженного импульса, которая определяется как возможностями метода фиксации, так и формой отраженного импульса. Известен ряд методов фиксации, отличающихся друг от друга тем, какая из временных точек импульса принимается за отсчетную. Наиболее распространены методы фиксации по переднему фронту, максимуму, энергетическому центру, а также середине импульса. Методика оценки погрешности фиксации временного положения импульсов известной формы при использовании данных методов изложена в работе [7].

При нестационарном отражении зондирующего излучения локатора от цели неизвестной конфигурации (в данном случае самолета), рассеивающих свойств покрытия и ракурса, форма и длительность регистрируемого сигнала также неизвестна. При этом момент фиксации временного положения отраженного импульса относится к некоторой условной точке (зоне) цели, положение которой относи-

Таблица 1. Средние значения и коэффициенты вариации отношения сигнала к шуму при оптимальном и квазиоптимальном приеме отраженных сигналов от самолетов, равновероятно ориентированных в 4π

Тип цели и покрытия	τ_n , нс	τ_{ϕ}^* , нс	$\bar{\mu}_o \sqrt{G}/K_0$	$\bar{\mu}_{ко} \sqrt{G}/K_0$	$C_{\mu o}$	$C_{\mu ко}$
А-10А	1	20	44,07	33,00	0,72	0,75
АК-512	10	30	37,91	30,09	0,69	0,68
	30	45	32,04	27,10	0,62	0,63
	50	60	28,09	24,90	0,58	0,58
	100	102	21,78	19,10	0,54	0,55
	300	300	13,27	12,06	0,53	0,53
А-10А	1	10	18,87	13,51	1,44	1,60
Ал. пудра	10	25	14,95	12,45	1,35	1,27
	30	40	12,12	11,03	1,18	1,24
	50	55	10,48	9,94	1,14	1,15
	100	100	8,08	7,86	1,02	1,05
	300	300	4,91	4,86	0,99	1,00
А-10А	1	5	1,54	1,22	1,74	1,68
ПФ-163	10	12	1,03	0,88	1,52	1,60
	30	30	0,78	0,72	1,33	1,41
	50	50	0,67	0,63	1,25	1,29
	100	100	0,51	0,50	1,19	1,20
	300	300	0,31	0,31	1,15	1,15
МиГ-17	1	15	19,49	14,08	0,87	0,89
АК-512	5	20	17,17	13,86	0,76	0,68
	10	25	15,88	13,62	0,71	0,65
	30	40	12,92	11,93	0,62	0,63
	50	55	10,96	10,52	0,59	0,60
	100	100	8,13	8,13	0,56	0,57
МиГ-17	1	7	9,66	6,84	1,55	1,61
Ал. пудра	5	10	7,97	6,42	1,36	1,42
	10	20	6,99	5,47	1,26	1,27
	30	33	5,24	4,52	1,13	1,14
	50	50	4,38	4,14	1,09	1,09
	100	100	3,27	3,14	1,06	1,05
МиГ-17	1	3	0,56	0,42	1,99	2,00
ПФ-163	5	7	0,43	0,37	1,75	1,74
	10	11	0,37	0,34	1,63	1,49
	30	30	0,28	0,26	1,46	1,39
	50	50	0,23	0,21	1,39	1,36
	100	100	0,17	0,16	1,32	1,33

тельно ее центра масс (геометрического центра) будет зависеть от перечисленных факторов. Погрешность измерения дальности до центра масс цели, вызванная нестационарностью временных характеристик отраженного излучения, будет определяться временным интервалом $\Delta_i = t_i - t_{цм}$, где $t_{цм}$ – момент времени, соответствующий точке центра масс цели, $t_i \in t_n, t_m, t_c, t_{ц}$ – моменты времени, соответствующие точке фиксации регистрируемого импульса по

его переднему фронту (t_n), по его максимуму (t_m), по середине импульса (t_c) и по его энергетическому центру ($t_{ц}$).

Результаты расчетов зависимостей величин $\Delta_{ц}$, Δ_c , Δ_m и Δ_n от угла курса $\varphi_{кс}$ (при нулевых углах крена и тангажа) самолета F-16 с направленно-рассеивающим покрытием для условия однопозиционной лазерной локации на длине волны $\lambda = 1,06$ мкм и при длительности зондирующего импульса $\tau_n \approx 10$ нс

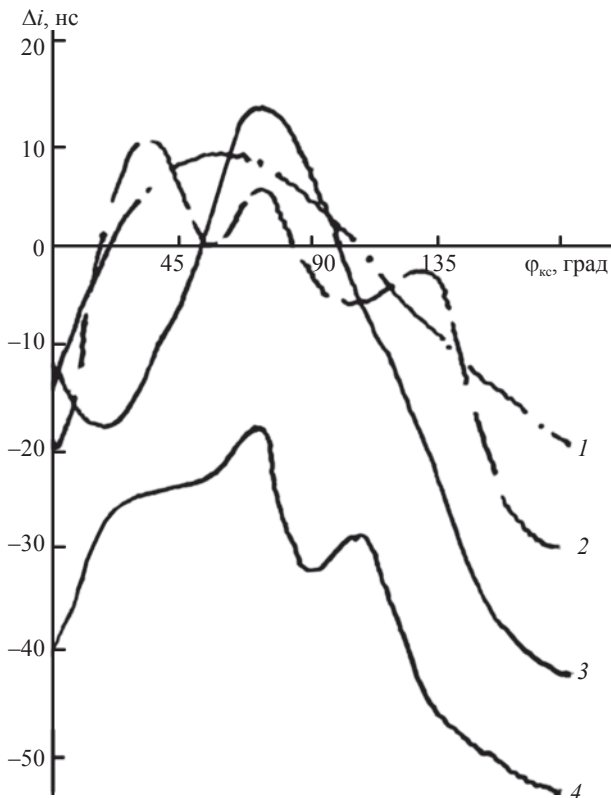


Рис. 3. Зависимости величин $\Delta_{\text{ц}}$ (1), $\Delta_{\text{с}}$ (2), $\Delta_{\text{м}}$ (3) и $\Delta_{\text{п}}$ (4) от угла курса самолета для условия однопозиционной лазерной локации на длине волны $\lambda = 1,06$ мкм и длительности зондирующего импульса $t_{\text{и}} \approx 10$ нс.

представлены на рис. 3. Как следует из рис. 3, для всех методов фиксации характерным является увеличенное значение погрешностей при лобовом ($\varphi_{\text{кс}} = 0^\circ$) и особенно хвостовом ($\varphi_{\text{кс}} = 180^\circ$) курсовых ракурсах самолета. Если считать ракурсы самолета случайными и равновероятно-распределенными в диапазоне углов $\varphi_{\text{кс}} = 0^\circ - 180^\circ$, то среднее значение ($\bar{\Delta}_i$) и СКО (σ_{Δ_i}) величин $\Delta_{\text{ц}}$, $\Delta_{\text{с}}$, $\Delta_{\text{м}}$ и $\Delta_{\text{п}}$

соответственно составили: $\bar{\Delta}_{\text{ц}} = -3,8$ нс, $\sigma_{\Delta_{\text{ц}}} = 11,4$ нс; $\bar{\Delta}_{\text{с}} = -6,1$ нс, $\sigma_{\Delta_{\text{с}}} = 12,1$ нс; $\bar{\Delta}_{\text{м}} = -9,9$ нс, $\sigma_{\Delta_{\text{м}}} = 20,1$ нс; $\bar{\Delta}_{\text{п}} = -30,2$ нс, $\sigma_{\Delta_{\text{п}}} = 11,1$ нс.

В табл. 2 приведены оценки средних значений ($\bar{\Delta}_i$) и СКО (σ_{Δ_i}) величин Δ_i , нормированных на величину $\bar{T}_{\text{об}} = 2 \bar{L}_{\text{об}}/C$ объекта, где $\bar{L}_{\text{об}}$ – средний размер объекта, для самолетов А-10А и МиГ-17 с диффузным (АК-512), направленно-рассеивающим (алюминиевая пудра) и зеркальным (ПФ-163) покрытиями, а также самолета F-16 с направленно-рассеивающим покрытием в случае их равновероятной ориентации в угле 4π . Отметим, что для самолетов А-10А, МиГ-17 и F-16 значения $\bar{T}_{\text{об}}$ соответственно равны 75, 50 и 56 нс.

Из данных табл. 2 следует, что для равновероятной ориентации самолетов в угле 4π при использовании методов фиксации по энергетическому центру и по середине импульса средние значения отклонения точки фиксации от центра масс самолетов с диффузным, направленно-рассеивающим и зеркальным покрытиями не превышают $\bar{\Delta}_{\text{ц}} \approx 0,1 \bar{T}_{\text{об}}$ и $\bar{\Delta}_{\text{с}} \approx 0,1 \bar{T}_{\text{об}}$ соответственно. Для метода фиксации по переднему фронту значение $\bar{\Delta}_{\text{п}}$ максимально и равно $\sim 0,5 \bar{T}_{\text{об}}$. Нормированные СКО (σ_{Δ_i}) величин Δ_i для всех рассмотренных методов фиксации, типов самолетов и их покрытий лежат в интервале $0,1 - 0,25 \bar{T}_{\text{об}}$. Минимальное значение σ_{Δ_i} получается при методе фиксации по энергетическому центру импульса ($0,1 - 0,15 \bar{T}_{\text{об}}$) и максимальное – при методе фиксации по максимуму импульса ($0,18 - 0,25 \bar{T}_{\text{об}}$), причем они практически не зависят от формы самолетов и их покрытий.

Таким образом, минимальную погрешность измерения дальности до центра масс самолетов-целей обеспечивает метод фиксации по энергетическому центру отраженного импульса. Незначительно ему уступает метод фиксации по середине импульса. Информативными признаками указанных объектов локации в задаче дальнометрии при нестационарном отражении излучения являются их

Таблица 2. Нормированные средние значения ($\bar{\Delta}_i/\bar{T}_{\text{об}}$) и СКО ($\sigma_{\Delta_i}/\bar{T}_{\text{об}}$) величин Δ_i для самолетов А-10А, МиГ-17 и F-16 с различными покрытиями при их равновероятной ориентации в угле 4π

Тип самолета	Тип покрытия	$\frac{\bar{\Delta}_{\text{ц}}}{\bar{T}_{\text{об}}}$	$\frac{\sigma_{\Delta_{\text{ц}}}}{\bar{T}_{\text{об}}}$	$\frac{\bar{\Delta}_{\text{с}}}{\bar{T}_{\text{об}}}$	$\frac{\sigma_{\Delta_{\text{с}}}}{\bar{T}_{\text{об}}}$	$\frac{\bar{\Delta}_{\text{м}}}{\bar{T}_{\text{об}}}$	$\frac{\sigma_{\Delta_{\text{м}}}}{\bar{T}_{\text{об}}}$	$\frac{\bar{\Delta}_{\text{п}}}{\bar{T}_{\text{об}}}$	$\frac{\sigma_{\Delta_{\text{п}}}}{\bar{T}_{\text{об}}}$
А-10А	АК-512	0	0,10	-0,02	0,16	0,01	0,20	-0,51	0,22
	Ал. пудра	-0,06	0,11	-0,04	0,17	-0,04	0,23	-0,44	0,21
	ПФ-163	-0,1	0,15	-0,11	0,18	-0,10	-0,24	-0,47	0,19
МиГ-17	АК-512	0,01	0,10	0	0,17	-0,04	0,18	-0,52	0,21
	Ал. пудра	0,01	0,11	-0,01	0,19	0	0,20	-0,46	0,19
	ПФ-163	0,03	0,15	0,1	0,20	0,01	0,22	-0,46	0,20
F-16	Ал. пудра	-0,06	0,15	-0,11	0,18	-0,18	0,25	-0,53	0,23

габариты и, соответственно, длительность отраженного импульса.

Оценка информативности положения энергетического центра изображения самолетов-целей в задаче наведения

Рассеянное поверхностью объекта излучение создает в координатной плоскости приемной системы локатора изображение, распределение яркости которого в общем случае неравномерно и определяется для заданных условий локации конфигурацией объекта и типом его покрытия. В задачах активного и полуактивного наведения по отраженному лазерному излучению требуется знание положения энергетического центра изображения объекта локации в связи с тем, что эту точку, как правило, отслеживает головка самонаведения.

Ниже приведены результаты исследований положения энергетического центра изображений различных типов самолетов-целей с различными покрытиями (от диффузного до зеркального) относительно положения геометрического центра их изображений для условий однопозиционной лазерной локации. За изображение цели данного ракурса примем двумерную функцию эффективных коэффициентов яркости облученных и наблюдаемых точек ее поверхности $\beta_{\text{эф}}(x, y)$, где x, y – координаты этих точек в плоскости изображения, или, что то же самое, их удельных ЭОП $\mathcal{E}_0(x, y)$ [8]. За энергетический центр изображения примем центр “тяжести” функции $\beta_{\text{эф}}(x, y)$, координаты которого x_3 и y_3 соответственно по осям OX и OY можно записать в виде

$$x_3 = \frac{\iint_S x \beta_{\text{эф}}(x, y) dx dy}{\iint_S \beta_{\text{эф}}(x, y) dx dy}, \quad (5)$$

$$y_3 = \frac{\iint_S y \beta_{\text{эф}}(x, y) dx dy}{\iint_S \beta_{\text{эф}}(x, y) dx dy},$$

где S – площадь изображения.

Положение энергетического центра изображения цели относительно его геометрического центра можно представить в виде вектора \mathbf{R} . Если связать с плоскостью изображения XOY комплексную плоскость, то этот вектор можно представить в виде

$$\mathbf{R} = R \exp(j\theta), \quad (6)$$

где $R = \sqrt{(x_T - x_3)^2 + (y_T - y_3)^2}$ – модуль вектора \mathbf{R} , $\theta = \arctg(y_T - y_3)/(x_T - x_3)$, x_T, y_T – координаты геометрического центра цели.

Результаты расчетов по (5) и (6) годографов вектора \mathbf{R} изображения самолета МиГ-17 с диффузным (АК-512), направленно-рассеивающим (алюминиевая пудра) и зеркальным (ПФ-163) покрытиями в зависимости от разворота цели по углу курса $\varphi_{\text{кц}}$ в интервале углов $0^\circ - 180^\circ$ с шагом 6° представлены на рис. 4 с размерами по координатным осям X и Y % от длины самолета L_d . На рис. 5 приведены диаграммы модуля (R) вектора \mathbf{R} (в % от L_d) самолетов Су-9 и МиГ-17 с теми же покрытиями, что и на рис. 4, в интервале углов курса $0^\circ < \varphi_{\text{кц}} < 180^\circ$. Из рис. 5 следует, что максимальное отклонение энергетического центра изображения указанных самолетов с диффузным покрытием от его геометрического центра не превышает соответственно 2,5 и 4 % от L_d , для самолетов с направленно-рассеивающим покрытием соответственно ≈ 12 и 16% от L_d , а для самолетов с зеркальным покрытием $\approx 32\%$ от L_d . Если принять во внимание, что L_d самолета Су-9 равно 16 м, а самолета МиГ-17 ≈ 11 м, то максимальные значения R в абсолютных величинах составят для самолетов Су-9 и МиГ-17 с диффузным покрытием $\approx 0,4$ и $0,5$ м, с

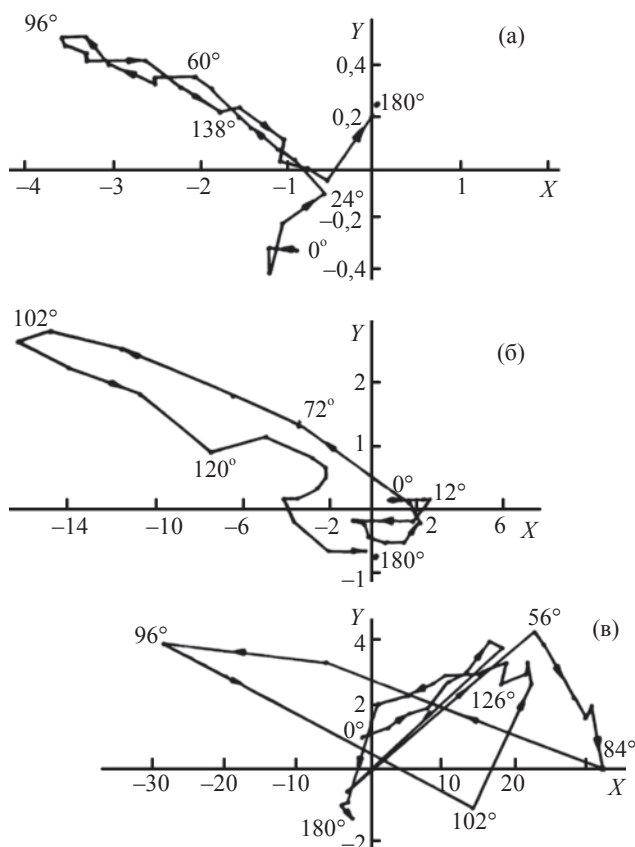


Рис. 4. Годографы вектора \mathbf{R} изображения самолета МиГ-17 с диффузным (а), направленно-рассеивающим (б) и зеркальным (в) покрытиями в зависимости от разворота цели по углу курса $\varphi_{\text{кц}}$ в интервале углов $0^\circ - 180^\circ$ с шагом 6° .

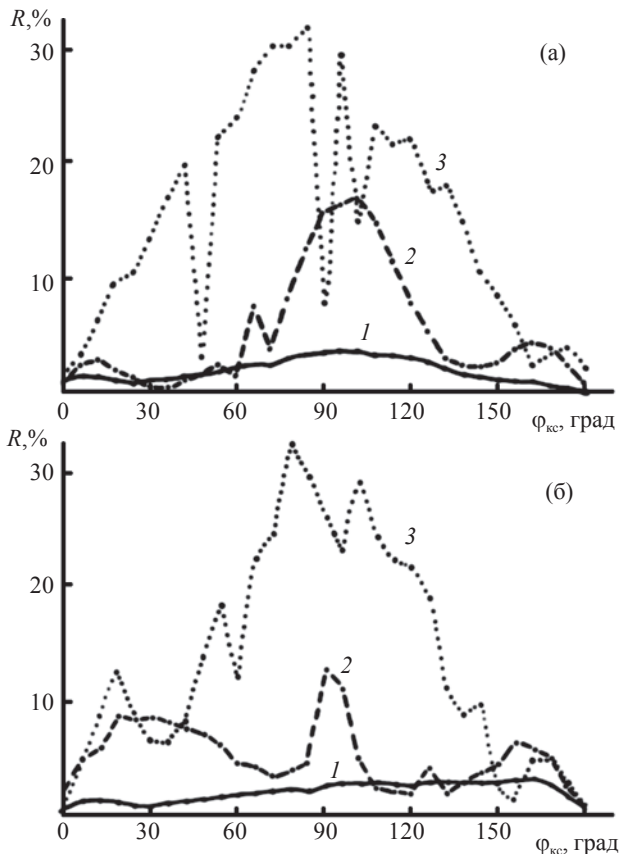


Рис. 5. Диаграммы модуля (R) вектора \mathbf{R} (в % от L_d) самолетов Су-9 (а) и МиГ-17 (б) с 1 – диффузным, 2 – направленно-рассеивающим и 3 – зеркальным покрытиями в интервале углов курса $0^\circ < \varphi_{\text{кк}} < 180^\circ$.

направленно-рассеивающим покрытием $\approx 1,92$ и $1,76$ м и с зеркальным покрытием $\approx 5,1$ и $3,5$ м соответственно. Результаты расчетов средних значений (\bar{R}) и СКО (σ_R) модуля вектора \mathbf{R} самолетов Су-9 и МиГ-17 с диффузным, направленно-рассеивающим и зеркальным покрытиями для равновероятной ориентации самолетов по углу курса, крена и тангажа, а также в угле 4π представлены в табл. 3 в % от L_d . Как видно из табл. 3, значение \bar{R} для условий равновероятной ориентации самолетов в 4π при диффузном покрытии составляет $\approx 1,5\%$ от L_d , при направ-

ленно-рассеивающем покрытии $\approx 4\%$ от L_d , при зеркальном покрытии $\approx 15\%$ от L_d . Коэффициент вариации σ_R/\bar{R} отклонения энергетического центра от геометрического центра практически постоянен и лежит в интервале $0,5-0,7$. Влияние формы планера самолета на указанные параметры распределений R невелико – разброс значений не превышает $\approx 1,65$ раза, основное различие (до 10 раз) обусловлено характеристиками покрытий.

Оценка информативности признаков самолетов-целей в задаче распознавания

В настоящем разделе описывается алгоритм расчета и приводятся оценки информативности ряда характерных признаков самолетов-целей, содержащихся в их дальностно-яркостных изображениях, для решения задачи распознавания. В качестве критерия информативности признаков принимается достижимая на их основе вероятность правильного распознавания цели с допустимой нормой ошибок.

Лазерно-локационное распознавание объектов и объектов на фоне относится к автоматическому (машинному) распознаванию. Используемый алгоритм машинного распознавания описан ниже. Комплексом средств получения априорной базы знаний в нашем случае является имитационная модель расчета многомерных сигналов, описанная в [1] и позволившая получить все необходимые исходные данные по входным воздействиям для интересующих условий локации. В библиотеку исходных данных входят результаты расчетов сигналов. Алгоритм классификации объектов представляет правило классификации воздушных целей по их типам. Словарь признаков объектов включает полное наименование априорных признаков объектов, т. е. тех, которые могут быть исследованы на предмет оценки их информативности и привлечены к решению задачи распознавания в зависимости от изменяющихся требований к системе и условий локации. Принципиально важным разделом является алгоритм задания (описания) классов объектов на языке признаков, т. е. их эталонного признакового про-

Таблица 3. Средние значения (\bar{R}) и СКО (σ_R) модуля вектора \mathbf{R} для самолетов Су-9 и МиГ-17 с различными покрытиями при их равновероятной ориентации по углам курса, крена, тангажа и в угле 4π

Покрытие	Самолет Су-9						Самолет МиГ-17					
	АК-512		Ал. пудра		ПФ-163		АК-512		Ал. пудра		ПФ-163	
Параметр	\mathbf{R}	σ_R	\mathbf{R}	σ_R	\mathbf{R}	σ_R	\mathbf{R}	σ_R	\mathbf{R}	σ_R	\mathbf{R}	σ_R
Курс	1,94	1,02	5,75	3,69	15,4	11,4	1,93	1,06	4,76	4,88	14,6	10,0
Крен	0,96	0,85	4,87	3,22	12,1	6,2	1,07	1,04	5,21	3,71	18,2	5,25
Тангаж	1,14	0,73	4,02	2,32	14,3	9,9	1,81	1,14	2,61	1,18	13,6	6,25
4π	1,35	0,87	4,88	2,68	14,0	9,17	1,61	1,08	4,2	3,26	15,4	7,2

странства, а также задания решающего правила распознавания. Процедура распознавания объектов, реализуемая локатором в одном акте испытания, включающем однократный обзор пространства наблюдения, регистрацию и обработку в реальном масштабе времени дальностно-яркостных изображений и извлечения из них апостериорных рабочих признаков реальной цели, относящаяся к вероятностной процедуре (правилу) распознавания, состоит в следующем. Согласно данному правилу если полученный локатором набор признаков лежит внутри области эталонных признаков, относящихся только к одному классу объектов, то объект относится к тому классу объектов, в область информационных признаков которых он попал. Если полученный набор признаков лежит внутри сразу нескольких классов, т. е. в области пересечения классов, то объект с равной вероятностью относится к каждому из этих классов. Если полученный набор не лежит внутри этих классов, то объект не относится к рассматриваемым классам объектов.

Классы объектов формируются в ячейках памяти ЭВМ. Для этого используют $n - 1$ двумерных массивов M_2, M_3, \dots, M_n , где n – число признаков размерностью $2k$ ячеек. Формирование класса начинается с перевода признака P_1 , стоящего в наборе признаков P_1, P_2, \dots, P_n первым, в новую систему счисления, где он будет измеряться в номерах дискрет N_{p1} , при этом $N_{p1} = 1 + (P_1/\Delta)$, где N_{p1} – номер дискреты, P_1 – значение первого признака в старой системе счисления, $\Delta = (P_{1\max} - P_{1\min})/K$ – цена дискреты, K – количество дискрет, $P_{1\max}$ и $P_{1\min}$ – взятые

в старой системе счисления соответственно максимальные и минимальные значения P_1 для всех классов объектов. Затем для каждого номера дискреты признака P_1 вычисляется интервал значений признаков P_2, P_3, \dots, P_n , максимальные и минимальные значения которых записываются соответственно в ячейки $M_2(N_{P_1, \min})$ и $M_2(N_{P_1, \max})$, $M_3(N_{P_1, \min})$ и $M_3(N_{P_1, \max})$, ..., $M_n(N_{P_1, \min})$ и $M_n(N_{P_1, \max})$. На этом формирование классов заканчивается. Каждый класс в данном конкретном случае будет представлять собой $n - 1$ двумерных массивов, являющихся набором интервалов признаков P_2, P_3, \dots, P_n по дискретам признака P_1 .

После заполнения массивов M_2, M_3, \dots, M_n в одномерный массив M_ϕ размерностью k ячеек записывается информация о пересечении классов. Запись проводится отдельно для каждой дискреты, при этом считается, что классы пересекаются, если интервалы всех одинаковых признаков этих классов имеют общие точки. Для записи информации используется ряд десятичных чисел, каждому из которых соответствует определенная комбинация пересечений. Так, если в пятую ячейку записано число 3, то это означает, что дискрете с номером 5 соответствует класс 3. Число 124, записанное в ячейку 6, означает, что в дискрете с номером 6 пересекаются классы 1, 2 и 4.

Для того чтобы узнать, к какому классу относится распознаваемый объект, достаточно вычислить по полученному от лоцируемого объекта набору признаков номер дискреты N_{p1} , а затем извлечь содержимое ячейки массива M_ϕ с номером N_{p1} . Так,

Таблица 4. Вероятности правильного распознавания самолетов А-10А с диффузным и F-16 с направленно-рассеивающим покрытиями по признакам $S, Д, Ш, H$ и их комбинациям в зависимости от $\Delta\theta$ и Δd для $\omega_s = \omega_s^m$, $\Delta l = \pm 1,5$ м

Признак	Пространственное разрешение					
	$\Delta d_1 = 0,25$ м			$\Delta d_2 = 2,0$ м		
	$\Delta\theta_1 = 0^\circ-30^\circ$	$\Delta\theta_2 = 0^\circ-60^\circ$	$\Delta\theta_3 = 0^\circ-90^\circ$	$\Delta\theta_1 = 0^\circ-30^\circ$	$\Delta\theta_2 = 0^\circ-60^\circ$	$\Delta\theta_3 = 0^\circ-90^\circ$
S	0,14	0,34	0,48	0,7	0,15	0,36
$Д$	0	0	0	0	0	0
$Ш$	1,0	1,0	0,76	1,0	0,48	0,69
H	0	0,15	0,29	0	0,90	0,19
SD	0,21	0,46	0,64	0,14	0,42	0,56
$SШ$	1,0	1,0	0,75	1,0	0,55	0,71
SH	0,14	0,40	0,58	0,28	0,21	0,37
$ДШ$	1,0	1,0	0,99	1,0	0,86	0,87
$ДH$	0	0,15	0,29	0	0,90	0,19
$ШH$	1,0	1,0	0,77	1,0	0,61	0,75
$SDШ$	1,0	1,0	1,0	1,0	0,94	0,94
SDH	0,28	0,53	0,75	0,21	0,42	0,63
$SШH$	1,0	1,0	0,83	1,0	0,69	0,75
$ДШH$	1,0	1,0	1,0	1,0	0,90	0,91
$SDШH$	1,0	1,0	1,0	1,0	0,94	0,95

если номер дискретности будет равен 5, а в ячейке номер 5 записано число 3, то объект будет относиться к классу 3. Если же номер дискретности равен 6, а в ячейке номер 6 записано число 124 – объект будет относиться одновременно к классам 1, 2 и 4.

На основе описанного выше алгоритма и реализующей его программы были рассчитаны вероятности правильного распознавания самолетов А-10А с диффузным ($\rho = 0,04$) и F-16 с направленно-рассеивающим ($\beta_{\text{эф},0^\circ} = 3,19$, $\theta_{0,5} = 12^\circ$) покрытиями. В качестве признаков цели использовались: S – площадь проекции изображения цели в картинной плоскости, D – глубина цели в направлении локации, $Ш$ – ширина изображения цели, H – высота изображения цели, их всевозможные комбинации по 2 и 3 признака, а также все 4 признака. Расчеты проведены для следующих условий локации: длина волны излучения $\lambda = 1,06$ мкм, длительность зондирующего импульса $\tau_{\text{и}} = 10$ нс, пространственное разрешение изображений $\Delta d_1 = 0,25$ и $\Delta d_2 = 2,0$ м, погрешность измерения глубины цели $\Delta l = \pm 0,5$, $\pm 1,5$, ± 2 м, энергетический потенциал локатора (произведение мощности излучения на пороговую чувствительность приемной системы) $w_{3,1} = w_3^m$, $w_{3,2} = 0,67w_3^m$, $w_{3,3} = 0,33w_3^m$, где w_3^m – максимальное значение энергетического потенциала, при котором возможен прием сигналов от всех разрешаемых элементов изображения цели для всех ракурсов в заданном диапазоне. При этом было принято, что ожидаемые ракурсы самолетов равновероятно распределены в пределах угловых зон, представляющих собой сферические сегменты с углами полураствора соответственно $\Delta\theta_1 = 0^\circ-30^\circ$, $\Delta\theta_2 = 0^\circ-60^\circ$, $\Delta\theta_3 = 0^\circ-90^\circ$ в переднюю полусферу.

В качестве примера в табл. 4 представлены результаты расчетов вероятностей правильного распознавания самолетов А-10А с диффузным и F-16 с направленно-рассеивающим покрытиями по указанным одиночным признакам S , D , $Ш$, H и их всевозможным комбинациям для следующих условий локации: $\Delta\theta_1 = 0^\circ-30^\circ$, $\Delta\theta_2 = 0^\circ-60^\circ$ и $\Delta\theta_3 = 0^\circ-90^\circ$, $\Delta d_1 = 0,25$ м и $\Delta d_2 = 2,0$ м, $\Delta l = \pm 1,5$ м, $w_3 = w_3^m$.

Как следует из табл. 4, для заданных условий локации из рассмотренных одиночных признаков наиболее информативным является признак $Ш$, из

двойных признаков – $DШ$, из тройных признаков – $SДШ$ и, естественно, максимальную информативность обеспечивает использование всех 4 признаков ($SДШH$).

Заключение

Материалы настоящей статьи иллюстрируют возможности разработанного и изложенного в [1] метода оценки информативности признаков объектов, заключенных в отраженных (в общем случае многомерных) сигналах, для рационального выбора параметров систем и их эффективного функционирования в заданных условиях применения.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Непогодин И.А.* Критерии и метод оценки информативности признаков объектов в задачах лазерной локации // Оптический журнал. 2007. Т. 74. № 1. С. .
2. *Хайтун Ф.И., Смолянский Б.Е.* О возможности увеличения дальности передачи импульсных световых сигналов // ОМП. 1957. № 3. С. 13–17.
3. *Непогодин И.А., Хайтун Ф.И.* О рациональном формировании излучаемых импульсов заданной энергии в устройствах оптической локации // ОМП. 1964. № 9. С. 13–17.
4. *Лебедев Е.Г., Порфирьев Л.Ф., Хайтун Ф.И.* Теория и расчет импульсных и цифровых оптико-электронных систем. Л.: Машиностроение. 1984. 189 с.
5. *Хайтун Ф.И., Непогодин И.А.* Некоторые вопросы передачи и приема оптических импульсных сигналов при учете дискретного характера флюктуационных шумов // ОМП. 1968. № 5. С. 1–6.
6. *Хайтун Ф.И., Лебедев Е.Г.* О влиянии формы лучистых импульсных сигналов на пороговые соотношения в системах с инерционными фотоприемниками // ОМП. 1969. № 7. С. 79.
7. *Митяшев Б.Н.* Определение временного положения импульсов при наличии помех. М.: Советское радио, 1962. 199 с.
8. *Непогодин И.А.* Основные виды отражательных характеристик тел в направлении приема и методы их измерения в оптике // Импульсная фотометрия. Л.: Машиностроение. 1981. В. 7. С. 124–131.