Физическая аппаратура и ее элементная база

УДК 535; 551.5; 621.384.3

Влияние внешних условий на выбор рабочих областей длин волн ИК-радиометров

А. И. Омелаев, В. Л. Филиппов
ФГУП «НПО "Государственный институт прикладной оптики"», г. Казань, Россия

Анализируются параметры тепловизионной аппаратуры, определяющие эффективность ее применения в динамике погодных условий в атмосфере и возможность улучшения отдельных из них за счет вариаций границ рабочих спектральных диапазонов (3—5 и 8—14 мкм) при определенном положении максимума спектральной чувствительности фотоприемника.

Затронутая тема неоднократно обсуждалась различными авторами [1—9] и, тем не менее, остается актуальной. Это объясняется не только недостаточной степенью адекватности знаний о вариациях спектроэнергетических характеристик окружающей среды, но и реальными возможностями оптимизировать конструкцию тепловизоров—радиометров (ТР) с учетом предлагаемых промышленностью номиналов элементной базы и рекомендаций, вытекающих из модельных расчетов их основных параметров.

Ниже рассматриваются результаты оценки влияния условий внешней среды на рабочие параметры ТР исходя из задачи улучшения последних за счет вариации границ спектральных областей 3—5 мкм (далее рабочая область РД I) и 8—14 мкм (РД II). Основополагающим в приводимом анализе является тезис, согласно которому преимущество диапазона длин волн 8—14 мкм в задаче обнаружения и распознавания малоконтрастных ($\Delta T_{o/f} \le 10$ K) слабонагретых объектов аппаратурой с достаточно высокими пространственным (~ 0,125 мрад) и температурным (≤ 0,04 K) разрешениями для любых условий небесспорно.

В представленном анализе на основе метода радиационных функций [8], максимизирующих отношение сигнал/шум (с/ш), были рассмотрены расчетные оценки для диапазонов РД I и РД II, позволяющие выделить не только влияние параметров внешних условий и атмосферы, но и определить возможности оптимизации границ спектральных диапазонов и положения максимума спектральной характеристики фотоприемника (ФП). Последнее позволяет разработчикам ТР улучшать пороговую чувствительность аппаратуры.

О необходимости сдвига максимума спектральной характеристики ФП в зависимости от изменения дальности действия ТР (т. е. протяженности L измерительной трассы) отмечается в [8]. При этом были проанализированы три режима работы ТР, а именно при ограничении шумами фона (ОФ), при ограничении внутренними шумами, а также промежуточные условия. В настоящей работе расчеты выполнялись для погодных ситуаций (температуры воздуха t_{air}, относительной влажности f, метеорологической дальности видимости S_m), приведенных в табл. 1.

Таблица 1

Исходные данные для расчета $\tau_a(\lambda)$

Номер ситуации	S_m, км	f, %	t_{air}, °C
1	5	90	20
2	10	90	20
3	5	90	-12
4	10	90	-12
5	10	90	20
6	10	90	-12
7	5	90	-12
8	5	90	20
9	10	90	-12
10	5	90	-12
11	20	50	20
12	20	90	20
13	20	90	-12
14	20	50	-12
15	20	50	-12
16	20	90	-12
17	20	90	20.
18	20	50	20
19	5	90	20
20	10	90	20

Расчет спектральной прозрачности атмосферы $\tau_{air}(\lambda)$ выполнялся в соответствии с [1, 2]. Основные результаты расчета максимумов радиационной функции R_{λ_m} приведены в табл. 2. Анализ показывает, что для "всепогодной" сис-

© Омелаев А. И., Филиппов В. Л., 2004

темы, работающей в широком диапазоне условий и дальностей, при использовании в качестве фотоприемника фоторезистора с характеристиками, гарантируемыми в настоящее время поставщиками и в режиме, близком к ОФ, в РД I наибольшее отношение с/ш достигается при значении $\lambda_{m_I} = 3{,}8$ мкм. Для ТР малой дальности (до 1 км) наряду с $\lambda_{m_I} = 3{,}8$ мкм допустимо использование $\lambda_{m_I} \in 4{,}5$—$4{,}6$ мкм, особенно в случае работы в условиях высокой относительной влажности (≥ 90 %) и температуры воздуха ~ 20 °С. В то же время для РД II при $\lambda_{m_{II}} \in 10{,}5$—$11{,}1$ мкм обеспечивается максимизация отношения с/ш независимо от дальности и метеорологических факторов во всем диапазоне рассмотренных условий.

Таблица 2

Значения максимумов радиационной функции $R_{\lambda_m}(L)$

Погодные условия по табл. 1	L = 1,0 км			L = 5,0 км			L = 10,0 км			Примечание
	$R_{4,1}$	$R_{4,9}$	$R_{13,2}$	$R_{4,1}$	$R_{4,9}$	$R_{12,5}$	$R_{4,1}$	$R_{4,9}$	$R_{12,5}$	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	6,67	8,47	40,70	2,43	2,48	10,20	0,75	0,71		Режим ограничения шумами фона
2	7,26	9,10	43,60	3,67	3,61	13,80	1,70	1,51		
3	4,29	6,80	50,40	1,82	2,64	24,20	0,67	0,90		
4	4,67	7,31	54,10	2,77	3,78	33,80	1,53	0,97		
5	6,56	8,23	39,80	2,22	2,19	88,30	0,63	0,56		
6	4,23	6,62	49,50	1,67	2,30	21,60	0,56	0,73		
7	5,45	6,92	34,00	8,89	9,16	41,60	0,10	0,10		
8	6,67	8,44	40,80	2,43	2,48	10,20	0,75	0,71		
9	3,71	5,79	42,80	8,77	1,18	10,40	0,15	0,19		
10	-2,70	4,27	31,50	1,81	2,57	23,20	0,07	0,01		
11	8,12	10,50	51,90	5,82	6,00	27,40	4,17	3,78		
12	7,79	9,69	45,80	5,21	4,97	17,50	3,43	2,90		
13	5,02	7,77	57,00	3,95	5,15	43,50	3,09	3,66		
14	5,08	8,03	58,50	4,06	5,58	47,10	3,22	4,13		
15	5,11	8,08	58,80	4,17	5,73	48,40	3,40	4,36		
16	4,92	7,63	5,61	3,59	4,70	30,20	2,55	3,05		
17	7,64	9,51	45,10	4,73	4,53	16,20	2,84	2,40		
18	8,10	10,50	52,20	5,98	6,16	28,10	4,40	3,98		
		$R_{4,8}$	$R_{11,3}$		$R_{4,7}$	$R_{11,0}$		$R_{4,7}$	$R_{10,5}$	
5		2,87	45,60		0,73	10,80		0,17	2,14	Режим ограничения внутренними шумами
1		2,95	46,80		0,83	12,80		0,22	3,00	
2		3,17	49,90		1,19	17,00		0,48	5,29	
16		1,40	45,60		0,86	33,90		0,55	24,50	
15		1,48	47,60		1,04	40,50		0,79	34,30	
17		43,31	51,60		1,49	19,80		0,75	7,02	
18		3,71	58,90		2,08	33,70		1,31	18,70	
19		2,24	35,90		0,21	3,38		0,01	0,02	
20		2,76	43,70		0,60	8,77		0,12	1,39	
14		1,50	47,30		1,00	39,00		0,80	32,60	
13		1,42	46,40		0,94	36,70		0,67	28,60	
11		3,69	58,50		2,02	32,80		1,24	17,80	
12		3,37	52,30		1,65	21,40		0,90	8,21	
9		1,06	34,90		0,22	8,91		0,04	1,70	
	$R_{3,9}$	$R_{4,5}$	$R_{11,0}$	$R_{3,8}$	$R_{4,6}$	$R_{10,7}$	$R_{3,8}$	$R_{4,6}$	$R_{10,2}$	
14	8,70	9,00	48,60	6,50	6,21	40,00	5,10	4,60	34,00	Режим промежуточных условий
13	8,61	8,78	47,60	6,32	4,27	38,00	4,86	4,14	30,10	
4	8,05	8,26	45,40	4,48	1,33	30,00	2,43	2,28	18,90	
9	6,39	6,54	35,90	1,41	—	9,30	0,24	0,21	1,81	
1	10,20	9,40	34,50	3,50	—	9,80	1,10	—	2,30	
2	11,10	10,10	36,60	5,30	—	12,90	2,40	—	4,10	
11	12,60	11,50	42,80	8,50	—	24,40	6,00	—	13,50	
12	11,90	10,70	38,40	7,50	—	16,10	4,90	—	6,30	
19	7,81	7,12	28,40	0,89	—	2,57	0,06	—	0,17	
20	9,72	8,80	32,10	2,68	—	6,64	0,61	—	1,07	
5	10,00	9,15	33,50	3,22	—	8,22	0,89	—	1,65	

Для ФП, работающих в режиме ограничения внутренними шумами, в РД I наилучшие результаты, не зависящие от дальности и внешних условий, могут быть получены при $\lambda_{m_I} = 4{,}8$ мкм.

При этом положение максимума радиационной функции РД II зависит от дальности действия системы. Так, для $L = 1$ км предпочтительны $\lambda_{m_{II}} \in 11{,}4 \pm 0{,}3$ мкм, при $L = 5$ км – $\lambda_{m_{II}} \in 11{,}0 \pm 0{,}5$ мкм, при $L \cong 10$ км $\lambda_{m_{II}} \in 10{,}6 \pm 0{,}6$ мкм.

Как видно, в задаче создания ТР с предельно достижимой чувствительностью наиболее перспективен режим ОФ. В подобных приборах при температуре воздуха 20 °С, $S_m \cong 5$ км и относительной влажности $f \cong 90$ % в диапазоне РД II значение с/ш может возрасти в 2,5 раза. Однако это преимущество реализуемо, если изменить положение максимума радиационной функции с 11,1 до 13,2 мкм в условиях применения ТР на дальностях $L \sim 1$ км; с 10,5 до 12,2 мкм для $L \leq 5{,}0$ км и с 10,0 до 11,5 мкм для $L \leq 10{,}0$ км. Для более сухого, прозрачного и холодного воздуха ($S_m = 20$ км, $f = 50$ %, $t_{air} = -12$ °С) переход к режиму ОФ приводит к увеличению отношения с/ш для диапазона L от 1 до 10 км в РД I в 3—4 раза, а в РД II — только в 1,2 раза. При этом для всех значений L следует обеспечить смещение положения максимума в сторону увеличения длин волн в среднем на 1,7 мкм по каждой из рассматриваемых градаций $L \in 1$—10 км. Необходимость увеличения λ_m (аналогично сдвигу максимума спектральной характеристики ФП в сторону бóльших значений длин волн) подтверждают и расчеты [10], выполненные с использованием данных [11] для ТР на основе многоэлементного ФП. Было показано, что в режиме ОФ для системы с апертурной диафрагмой 60°, относительным отверстием 1:2 при температуре среды 20 °С увеличение в РД II λ_m до значений, больших 10,5 мкм, на трассах малой протяженности улучшает температурное разрешение на 15 %.

Положение максимума спектральной характеристики ФП и его сдвиг, максимизирующие отношение с/ш, зависят также от полуширины спектральной характеристики $S(\lambda)$. Так, для РД II при полуширине $S(\lambda)$ 1,6 мкм, определяемой спектральной характеристикой приемника $Cd_{0,2}Hg_{0,8}Te$, протяженность трасс в атмосфере (от 1 до 10 км) практически не влияет на положение максимума радиационной функции, в то же время при увеличении полуширины спектра до 1,8 мкм максимум сдвигается примерно на 0,5 мкм в сторону уменьшения длин волн. При этом максимальные энергетические потери для атмосферной трассы в 1 км составили около 40 % в случае сдвига максимума в область значений $\lambda_{m_{II}} = 9{,}0$ мкм.

Представляют интерес оценки влияния на пороговую чувствительность многоспектральных ТР [1] и комбинаций спектральных зависимостей пропускания атмосферы, оптики и параметров ФП. Пример таких расчетов приведен в табл. 3 и на рис. 1—4, из которых следует, что для рассмотренных вариантов в диапазонах 3,0—5,0 и 8,0—14,0 мкм пороговая чувствительность радиометров ухудшается атмосферой на трассе 1 км примерно одинаково в интервале значений от 1,4—1,8 до 3,4—3,6 раза. При этом наименьшее ухудшение будет иметь место при использовании аппаратуры с германиевой оптикой и ФП на CdHgTe с "узкополосной" характеристикой. Снижение чувствительности за счет слияния атмосферы в 3,4—3,6 раза в реальных условиях влечет за собой применение комбинации германиевой оптики и приемника на основе InSb или оптической керамики (КО-41, ИКС-25, 29) и приемника на основе CdHgTe с бóльшей полушириной спектральной полосы ("широкополосной" характеристикой).

Таблица 3

Исходные данные по приемникам, оптике и интегральные оценки значений логарифмической относительной ширины полосы пропускания с учетом спектральных характеристик ФП, оптической системы (ОС), атмосферы

Номер комбинации	Спектральный диапазон	$D^*_{\lambda_m}$, $Вт^{-1}\cdot см\cdot Гц^{1/2}$	Материал ФП (наименование изделия), номер рисунка и кривой $S(\lambda)$	$(\Delta\ln\lambda)_F$ ФП	Материал ОС, изделие, номер рисунка и кривой $\tau_o(\lambda)$	$(\Delta\ln\lambda)_F$ (ФП+ОС)	$(\Delta\ln\lambda)_F$ ОС
1	РД I	$1\cdot10^{11}$	InSb, рис. 3, крив. 2	$3{,}42\cdot10^{-2}$	(Манчак-Н, с телеск.)	$2{,}38\cdot10^{-2}$	$1{,}0\cdot10^{-2}$
2		$1\cdot10^{10}$	PbSe, рис. 3, крив. 1	$1{,}70\cdot10^{-2}$	Рис. 3	$1{,}36\cdot10^{-2}$	$0{,}64\cdot10^{-2}$
3		$7\cdot10^{10}$	CdHgTe ($x = 0{,}325$) рис. 3, крив. 3, 5	$0{,}69\cdot10^{-2}$		$0{,}59\cdot10^{-2}$	$0{,}49\cdot10^{-2}$

Окончание табл. 3

Номер комбинации	Спектральный диапазон	$D^*_{\lambda_m}$, Вт$^{-1}$·см·Гц$^{1/2}$	Материал ФП (наименование изделия), номер рисунка и кривой $S(\lambda)$	$(\Delta\ln\lambda)_F$ФП	Материал ОС, изделие, номер рисунка и кривой $\tau_o(\lambda)$	$(\Delta\ln\lambda)_F$(ФП+ОС)	$(\Delta\ln\lambda)_F$ОС
4	РД II	$2\cdot10^{10}$	CdHgTe ФР-155 (Тракт), рис. 2, крив. 3	$2{,}75\cdot10^{-1}$	Ge (Тракт), рис. 4, крив. 2	$1{,}98\cdot10^{-1}$	$1{,}5\cdot10^{-1}$
5		$1{,}5\cdot10^{10}$	CdHgTe легир. Au, рис. 2, крив. 4	$3{,}16\cdot10^{-1}$	ИКС-25, 29, КО-41 (Тракт-1), рис. 4, крив. 1	$1{,}63\cdot10^{-1}$	$1{,}21\cdot10^{-1}$
6		$2\cdot10^{10}$	CdHgTe (Лира-ФП), рис. 2, крив. 5	$3{,}16\cdot10^{-1}$		$1{,}17\cdot10^{-1}$	$0{,}89\cdot10^{-1}$

Примечание: $(\Delta\ln\lambda)_F = \int\varphi(\lambda)S(\lambda)\tau_o(\lambda)\tau_a(\lambda)d\ln\lambda$, где $\varphi(\lambda)$, $S(\lambda)$, $\tau_o(\lambda)$, $\tau_a(\lambda)$ — спектральные характеристики излучения объекта, приемника, пропускания оптики и атмосферы на трассе измерения до объекта.

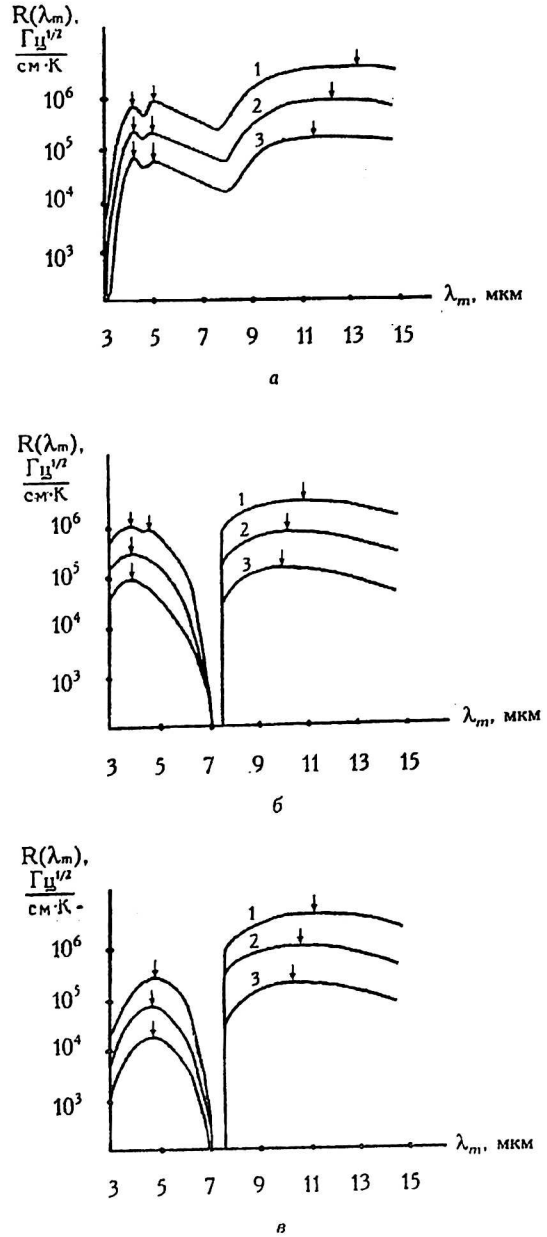

Рис. 1. Радиационная функция $R(\lambda_m)$:
а — режим ограничения шумами фона (ОФ);
б — режим, близкий к ОФ;
в — режим ограничения внутренними шумами

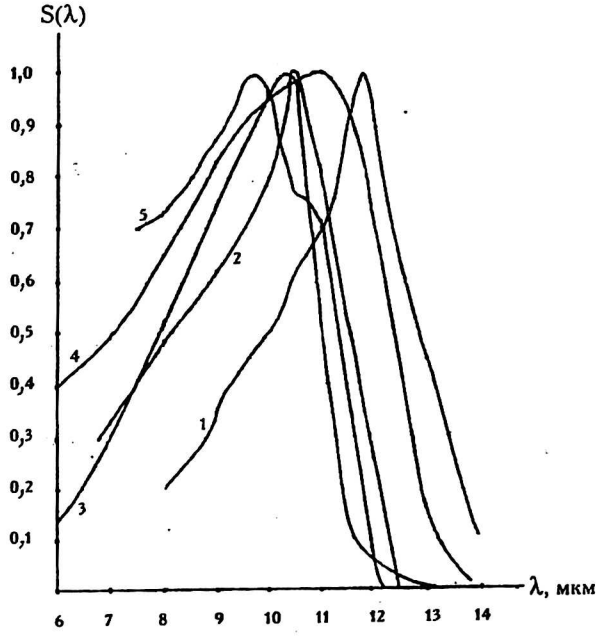

Рис. 2. Спектральные характеристики ФП диапазона II:
1 — CdHgTe; 2 — $Cd_{0,2}Hg_{0,8}Te$, легиров. Au; 3 — Фр-155 "Невесомость-10"; 4 — CdHgTe, легир. Au, полуширина спектра 2,8 мкм, 32 эл; 5 — "Лира-ФП"

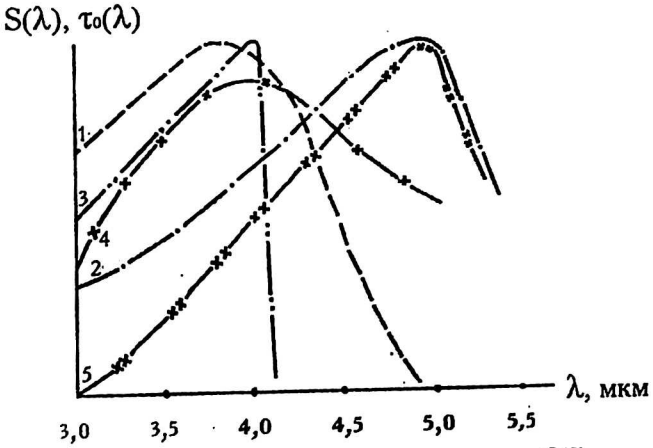

Рис. 3. Спектральные характеристики ФП и ОС диапазона I:
1 — S(λ) PbSe; 2 — S(λ) InSb; 3 — S(λ) CdHgTe
4 — $\tau_o(\lambda)$ Ge; 5 — CdHgTe

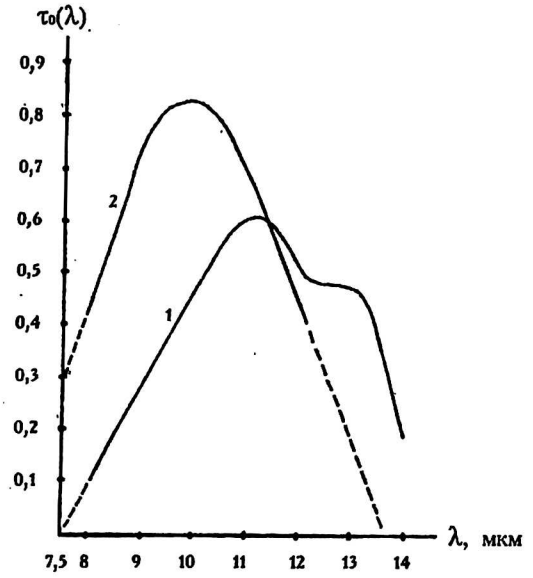

Рис. 4. Спектральные характеристики ОС:
1 — ИКС-25, 29, КО-41; 2 — Ge, 4 линзы, 2 зеркала

Компенсация снижения пороговой чувствительности за счет влияния атмосферы во всех спектральных каналах достижима при увеличении диаметра входного зрачка оптики, уменьшении полосы частот при снижении кадровой частоты, а также увеличении суммарного пропускания спектроделителей.

Для ТР, применяемых в интересах исследования природных ресурсов и выявления температурных неоднородностей, важно рассмотрение затронутой проблемы с учетом данных о средних яркостях и контрастах природных образований (фоновых ансамблях, табл. 4), которые позволяют разработчикам принять также меры к повышению помехозащитных свойств аппаратуры (например, за счет использования двухзеркальной схемы построения ТР с компенсирующим каналом от помех типа "солнечной дорожки" на водной поверхности [12—15]).

Таблица 4

Влияние облачности на уровень дисперсии фона

Фоновые образования	Лес			Небо			Город		
Спектральный диапазон, мкм	Условия облачности и время суток								
	Ясное небо, день	Сплошная облачность, день	Ночь	Частично покрыто облаками, день	Частично покрыто облаками, ночь	Ночь	Ясное небо, день	Сплошная облачность, день	Ночь
2—3	$1{,}7\cdot10^{3}$	$1{,}6\cdot10^{2}$	x	$1{,}0\cdot10^{5}$	x	x	$1{,}4\cdot10^{4}$	$1{,}0\cdot10^{2}$	$1{,}0\cdot10$
3—4	$6{,}6\cdot10^{2}$	$2{,}9\cdot10^{2}$	$2{,}6\cdot10$	$1{,}0\cdot10^{3}$	x	x	$3{,}1\cdot10^{3}$	$4{,}0\cdot10^{2}$	$2{,}5\cdot10$
4—5	$2{,}5\cdot10$	$2{,}5\cdot10$	$2{,}3\cdot10$	$3{,}1\cdot10^{2}$	$3{,}1\cdot10^{2}$	$8{,}0\cdot10$	$1{,}1\cdot10^{3}$	$1{,}0\cdot10^{3}$	$1{,}0\cdot10^{2}$
8—14	$5{,}3\cdot10^{3}$	$5{,}3\cdot10^{3}$	$5{,}3\cdot10^{3}$	$3{,}7\cdot10^{6}$	$3{,}7\cdot10^{6}$	$2{,}0\cdot10^{3}$	$1{,}8\cdot10^{5}$	$7{,}0\cdot10^{4}$	$6{,}5\cdot10^{3}$

Примечание: x — уровень дисперсии не воспринимается измерителем, единица измерения $(Вт\cdot см^{-2}\cdot ср^{-1})^2$.

Продолжение табл. 4

Дисперсия фона и среднее значение яркости в различных спектральных диапазонах

Диапазон спектра, мкм	Небо		Земля	
	$R(0)$, $(Вт\cdot см^{-2}\cdot ср^{-1})^2$	B_{mid}, $(Вт\cdot см^{-2}\cdot ср^{-1})^2$	$R(0)$, $(Вт\cdot см^{-2}\cdot ср^{-1})^2$	B_{mid}, $(Вт\cdot см^{-2}\cdot ср^{-1})^2$
1,8—3,65	$4{,}05\div7{,}0\cdot10^{-3}$	0,97÷5,95	$5{,}5\cdot10^{-1}\div6{,}3\cdot10^{-3}$	0,23÷1,38
3,2—4,3	$1{,}7\cdot10^{-3}\div1{,}0\cdot10^{-1}$	0,21÷0,59	$4{,}3\cdot10^{-1}\div5{,}3\cdot10^{-1}$	0,15÷0,35
3,5—6,0	$3{,}8\cdot10^{-3}\div1{,}5\cdot10^{-1}$	2,21÷5,29	$1{,}2\cdot10^{-3}\div4{,}8\cdot10^{-3}$	2,29÷2,93
4,5—5,4	$1{,}3\cdot10^{-3}\div1{,}3\cdot10^{-1}$	0,85÷2,75	$6{,}4\cdot10^{-4}\div1{,}1\cdot10^{-1}$	1,25÷1,47
8—14	$6{,}65\cdot10^{-3}\div3{,}39$	16,3÷29,8	0,29÷0,78	28,5÷29,8

Продолжение табл. 4

Дисперсия лучистости фоновых образований

Параметры аппаратуры		Условия измерения, высота, м							
		350				С крыши здания			2000—5000
Мгновеннос поле зрения, угл. мин		1x6			4x4	~ 10			30x30
Скорость сканирования, рад/с		0,107				0,05			—
Δλ, мкм		3,2—4,3	4,5—5,4	3,5—6	8—14				0,3—11,5
$R(0)$, $(Вт\cdot см^{-2}\cdot ср^{-1})^2$	небо	$1{,}7\cdot10^{-11}\div1\cdot10^{-9}$	$1{,}3\cdot10^{-11}\div1{,}3\cdot10^{-9}$		$6{,}65\cdot10^{-11}\div3{,}4\cdot10^{-9}$	$1{,}0\cdot10^{-9}$	$3{,}1\cdot10^{-10}$	$3{,}7\cdot10^{-6}$	$(1{,}04—2{,}55)\cdot10^{-6}$
	лес			$5{,}0\cdot10^{-11}$	$(0{,}5—0{,}6)\cdot10^{-8}$	$2{,}9\cdot10^{-10}$	$2{,}5\cdot10^{-11}$	$5{,}3\cdot10^{-9}$	$(1{,}2—3{,}6)\cdot10^{-8}$
	город			$(1{,}3—2{,}9)\cdot10^{-10}$		$3{,}1\cdot10^{-9}$	$1{,}1\cdot10^{-9}$	$1{,}8\cdot10^{-7}$	—
	вода			$5{,}85\cdot10^{-11}$		—	—	—	$(6{,}2—7{,}0)\cdot10^{-10}$

Окончание табл. 4

Значения вариаций яркости фоновых ансамблей

Фоновые ансамбли	Спектральный диапазон, мкм				Δh_0, град
	3,5—5,5		8—12		
	B_{mid}, min	B_{mid}, max	B_{mid}, min	B_{mid}, max	
	Вт· м$^{-2}$·ср·мкм		Вт· м$^{-2}$·ср·мкм		
Поля заснеженные	0,25—1,32	0,5—2,1	0,56—3,25	3,9—11,2	4—27,0
Поля зеленые	0,6—1,0	0,6—10,0	0,5—8,4	2,7—8,6	8,0—59
Поля бурые	0,4—4,0	0,6—33,0	0,6—8,4	1,0—9,2	8,0—50
Полупустыня	0,1	1,1	7,2	10,0	6,0—66
Лес зеленый	0,4	0,6—0,7	7,1—7,2	9,3	17—58
Лес заснеженный	0,3	0,5	0,44	4,8	7—28

Примечание. Приводимые в таблице данные получены аппаратурой с углом поля зрения ~ 3°x4°, пороговой яркостью (1—2)·10^{-6} Вт·см$^{-2}$·ср$^{-1}$·мкм$^{-1}$, что обеспечивает спектральное разрешение 0,07 мкм (в диапазоне 3,0—5,0 мкм) и 0,2 мкм (в диапазоне 8,0—14,0 мкм). Вариации яркости фона при фиксированном типе подстилающей поверхности обусловлены в основном вариациями средней температуры этой поверхности, вариациями величины отраженного солнечного излучения (в диапазоне 3,0—5,0 мкм) и локальными неоднородностями поверхности (последний фактор определяет требования по углу поля зрения аппаратуры).

По данным ФГУП «НПО "ГИПО"», среднеквадратичные пространственные вариации эффективной радиационной температуры для фоновой поверхности одного типа составляют 1—1,7 К. Вариации спектральных яркостей фонов в областях 3,0—5,0 и 8—14 мкм коррелированы, особенно для интервалов 4,5—5,1 и 8,0—14,0 мкм, так как в этих диапазонах даже в дневное время значения яркости определяются в основном тепловым излучением фона. По результатам всех проводимых измерений величины средних яркостей фона в спектральном диапазоне 8—12 мкм в 5—10 раз больше, чем в спектральном диапазоне 3,5—5,5 мкм. Для заснеженных полей и леса величины средних яркостей и различных условий радиометрирования местности с увеличением "высоты солнца" для большинства исследованных фоновых ансамблей возрастают, особенно в спектральном диапазоне 8—12 мкм, величины средних яркостей фонов практически независимы от "высоты солнца". Дисперсия флуктуаций наземного фона как днем, так и ночью, значительно больше в спектральном диапазоне 8—14 мкм, чем в диапазоне 3—5 мкм (на один — два порядка).

По результатам летных исследований сигналов от подстилающих поверхностей, проведенных в летне-осенне-зимний периоды в интервалах длин волн 3,1—5,2; 4,2—5,1 и 3,1—4,1 мкм с высот 0,3—4,0 км сотрудниками ФГУП «НПО "ГИПО"» (В. А. Барченко, Б. Ф. Лесниковым, Д. Г. Юдиным) выявлены наиболее опасные (с точки зрения числа превышений выбросами фоновых сигналов определенного порогового уровня яркости) ландшафты и ситуации: солнечная дорожка на воде, пустыни, оазисы, высокие горы (> 4,0 км), тундра. При этом солнечная дорожка проявляется тогда, когда ракурс полета относительно вертикала солнца равен 0°. Наилучшим спектральным диапазоном для аппаратуры с ФП на основе InSb, обнаружительная способность которого (по 100-градусному черному телу) составила 6·10^9 см·Гц$^{1/2}$·Вт$^{-1}$, по отношению величины сигнал/помеха является диапазон 4,2—5,1 мкм, что подтверждается и расчетными данными при сравнении возможностей отмеченного и более широкого диапазона 3,5—5,2 мкм. Осенне-зимние самолетные исследования фона в области спектра 8,3—12,2 мкм с высот 0,5—3,0 км по четырем ракурсам (0, 90, 180, 270°) относительно вертикала солнца показали, что фоновый сигнал от направления на солнце практически не зависит, причем на водной поверхности сигнала от солнечной дорожки не наблюдалось.

В целом рассмотренные в данной статье материалы по влиянию внешних условий, включая состояние атмосферы и пропускание в ИК-области спектра, дают удовлетворительные результаты для случаев, когда интегральный коэффициент пропускания не становится меньше, чем 0,1—0,15. Для наблюдения трасс, больших 20 км, и условий, характеризуемых МДВ < 1 км, снижение погрешностей оценок может быть обеспечено, по-видимому, при учете процессов многократного рассеяния ИК-излучения в направлении его распространения.

Литература

1. *Макаров А. С., Омелаев А. И., Филиппов В. Л.* Введение в технику разработки и оценки сканирующих тепловизионных систем. — Казань: Унипресс, 1998. — 320 с.
2. *Иванов В. П.* Прикладная оптика атмосферы в тепловидении. — Казань: Новое знание, 2000. — 357 с.
3. *Алеев Р. М., Овсянников В. А., Румянцева Н. А.*// Оптический журнал. 1992. № 5. С. 7—10.
4. *Валентюк А. Н.*// Оптико-механическая промышленность. 1989. № 10. С. 22—24.
5. *Jasumasa Itagura, Suteo Jsutsumi and Thori Takasi*// Infrared Physics. 1974. V. 14. P. 17.
6. *Biberman L. M.* Unartanties in comparision of FLIR performance in the 3,0—5,0 μm bands // IDA, 1979, pap. P-1128.
7. *Мочалин В. Д.* // Оптический журнал. 1991. № 6. С. 24—26.
8. *Milton M. P., Harvey G. L., Schmidt A. W.* Comparision of the 3,0—5,0 мкм and 8,0—12,0 мкм Regions for Advanced Thermal Imaging Systems LOWTRAN Revisited// Naval Research Laboratory. — Washington, DC, 20375, 1978.

9. *Алеев Р. М., Иванов В. П., Овсянников В. А.* Основы теории анализа и синтеза воздушной тепловизионной аппаратуры. — Казань: Казанский университет, 2000. — 250 с.

10. *Соляков В. Н., Сагитов Л. Д.* Влияние спектральной характеристики ИК-фотоприемников диапазона 8—12 мкм на парамстры тепловизионных систем// В кн. Тез. докл. XIV Междунар. науч.-техн. конф. по фотоэлектронике и ПНВ. — М.: НПО "Орион", май, 2000.

11. *Госсорг Ж.* Инфракрасная термография. Основы, техника, применение: Пер. с фр. — М.: Мир, 1988. — 425 с.

12. *Поварков В. И., Иванов Н. Е., Кабанин В. Ф.*// Оптико-механическая промышленность. 1988. № 4. С. 32—33.

13. *Рачкулик В. И., Ситникова М. Н.* О зависимости коэффициента яркости природных объектов от угла зрения фотометра: Тр. САРНИГМИ. 1977. Вып. 40 (12). С. 29—38.

14. *Петраковский И. А., Хлебоприс Р. Г.*// Изв. Сиб. отд. АН СССР. 1977. № 8. Сер. техн. наук. Вып. 2.

15. *Макаров А. С.*// Военный парад, 1996 ноябрь—декабрь. С. 42—45.

Influence of the environment on choosing the operating wavelength regions of IR-radiometers

A. I. Omelajev, V. L. Philippov
Federal Scientific-and-Production Center "State Institute of Applied Optics", Kasan, Russia

The paper analyzes the thermal imaging system parameters defining the efficiency of its application in the weather conditions dynamics in atmosphere and the opportunity of improving the individual characteristics by changing the limits of the operating spectral ranges (3—5 and 8—14 μm) in determining the positive maximum of the photodetector spectral response.