

---

УДК 621.378:535

## **Помехоустойчивость фотоприемного устройства на основе HgCdTe при воздействии лазерного излучения инфракрасного диапазона длин волн**

**О.В. КОРНАКОВА**

### **Аннотация**

Работа посвящена актуальной теме – влиянию помех на работу фотоприёмного устройства. Определен технический облик фотоприёмного устройства (ФПУ), выбран гибридный матричный приёмник ИК излучения на основе HgCdTe.

**Ключевые слова:** помехоустойчивость; фотоприемное устройство; лазерное воздействие; длина волны; матричный приемник; оптико-электронная система; лазерная помеха.

### **Введение**

Задачи исследования: исследовать технический облик и характеристик оптико-электронной системы космического базирования на основе матричного приемника HgCdTe, определить вероятность обнаружения сигнала при лазерной помехе, как функцию отношения сигнала к шуму, определить отношение силы излучения лазерной помехи к силе излучения регистрируемого сигнала, при котором его регистрация маловероятна.

## Описание метода исследования

Приемник регистрирует с высоты 1 ÷ 3 тыс.км поднимающийся с уровня земли светящийся объект, а помеховое воздействие лазерного излучения происходит с высоты ≈ 10км. Наблюдение за светящим объектом ведется в средней ИК области. Длина трасс, как от помехового лазера, так и от источника до приемника, примерно равны и составляют несколько тысяч километров. Угол между излучением помехи и светящим источником составляет  $\alpha$  градусов (лазер и светящийся факел находятся в разных плоскостях). На ФПУ изображение объекта и лазерной помехи приходится на разные области гибридной матрицы.

## Технический облик и модель приемника

При определении характеристик использовалась формула для определения основной характеристики-дальности.

$$L_{S\phi} = (J\tau_a)^{1/2} \left[ \frac{\pi}{2} D_0 (NA)\tau_0 \right]^{1/2} (D^*)^{1/2} \left[ \frac{1}{(\omega\Delta f)^{1/2} \frac{c}{u}} \right]^{1/2} \quad (1)$$

$J$  — спектральная сила излучения цели;  $\tau_a$  — спектральное пропускание трассы между входным устройством и целью;  $D_0$  — диаметр входного устройства;  $\tau_0$  — спектральное пропускание входного устройства;  $NA$  — числовая апертура;  $\omega$  — мгновенное поле зрения входного устройства;  $\Delta f$  — эквивалентная шумовая полоса частот.

Первый множитель определяется силой излучения цели и пропусканием излучения вдоль линии визирования.

Второй множитель содержит различные факторы, характеризующие оптику (диаметр входного устройства, числовую апертуру, которая не должна превышать 1, спектральное пропускание входного устройства).

Третий множитель характеризует приемник излучения. Достичь увеличения максимальной дальности обнаружения можно лишь в результате защиты приемника от фоновой засветки.

Четвертый множитель содержит факторы, описывающие систему и характеристики обработки сигнала. Он показывает, что уменьшение поля зрения, полосы частот увеличивает максимальную дальность обнаружения.

Технический облик фотоприёмного устройства для обнаружения удаленного источника излучения представленный на рис. 1.

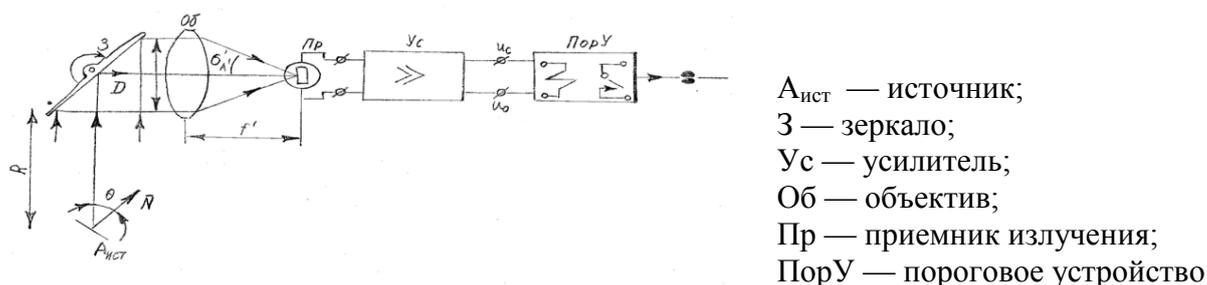


Рис. 1 — Структурная схема фотоприемного устройства для обнаружения удаленного источника излучения

### Состав фотоприемного устройства

Излучение от источника попадает на сканирующее зеркало, а дальше от сканирующего зеркала на входную апертуру объектива, собирается на приемнике излучения. Объектив, предназначенный для сбора поступающего излучения на фотоприемник. В качестве ФПУ выбрана гибридная матрица фотодиодов на основе HgCdTe. Размер одного пикселя составляет  $60 \times 60$  мкм, количество пикселей в одной сборке  $64 \times 64$ ,  

$$D^* = 6 \cdot 10^{12} \frac{\text{см} \cdot \text{Гц}^{\frac{1}{2}}}{\text{Вт}} \quad [1].$$

### Предполагаемые параметры оптико-электронной системы

1. Объектив линзовый, диаметр входного зрачка 6см, фокусное расстояние 12,4см, коэффициент прозрачности оптического тракта 0,85, гибридное фотоприёмное устройство на основе HgCdTe, размер чувствительного элемента  $60 \times 60$  мкм, рабочая температура приёмника  $77^\circ\text{K}$ , мгновенное поле зрения 2 град, диапазон длин волн 2,7-3 мкм, динамический диапазон  $10^5$ , минимальное значение с/ш 3, ограничение чувствительности фоновыми помехами, время накопления сигнала  $33,3 \cdot 10^{-6}$ с.

Матричный фотоприемник на основе твердых растворов состоит из: фоточувствительного слоя разделенного на отдельные элементы пиксели и электрически связанные с ним системы считывания и первичной обработки сигнала (мультиплексор).

Матрица и система считывания, сформированные, на разных подложках представлена на рис. 2. Электрическое соединение производится с помощью индиевых столбиков. Для уменьшения коэффициента отражения излучения от матрицы на подложку нанесено покрытие. Фильтр служит для пропускания излучения.

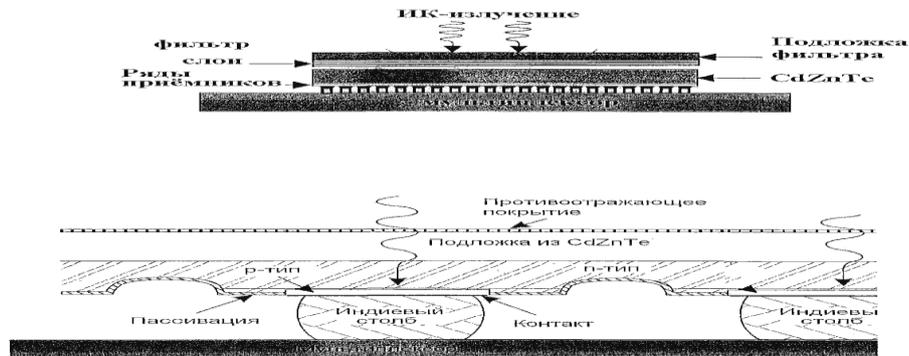


Рис. 2 — Конструкция гибридного фотоприемного устройства на основе HgCdTe

### Вероятность обнаружения сигнала по однократному наблюдению с учетом необходимого отношения сигнал к помехе

Количественной характеристикой помехоустойчивости служить вероятность обнаружения сигнала. Рассмотрим случай однократного наблюдения с учетом заданного отношения сигнал к шуму. Формула для вероятности обнаружения сигнала:

$$P_{обн} = 0,5[1 - \Phi(z_0)],$$

$$\Phi(z_0) = \frac{2}{\sqrt{2\pi}} \int_0^{z_0} e^{-\frac{t^2}{2}} dt, \quad Z_0 = y - \rho; y = U_0 / U_{ш}; \rho = U_{сmax} / U_{ш},$$

$y$ - порог ограничения;

$U_0$  - порог срабатывания порогового устройства;

$\rho$  - отношение сигнал к помехе.

Порог ограничения ( $y$ ) выразим через период ложных тревог ( $T$ ) и дисперсию частоты рекомбинационного шума  $f_{ш}^2$ .  $y = \sqrt{2 \ln T} (f_{ш}^2)^{\frac{1}{2}}$ ,  $T = 1,44 T_{ЛТ}$ ,  $T_{ЛТ}$  - время ложной тревоги. Время ложной тревоги заранее заданное время, в течение которого не допускается выбросов шума за уровень  $U_0$ , равно времени накопления сигнала  $33,3 \cdot 10^{-6}$ с. [2]

На графике (см. рис. 3) представлена зависимость вероятности обнаружения от отношения сигнал к шуму при  $y=1,7$ . Как видно из графика регистрация сигнала

маловероятна, когда на чувствительный элемент матрицы, регистрирующий сигнал воздействует лазерная помеха с соотношением сигнал-помеха равный 1,  $P_{обн}=0,25$ .

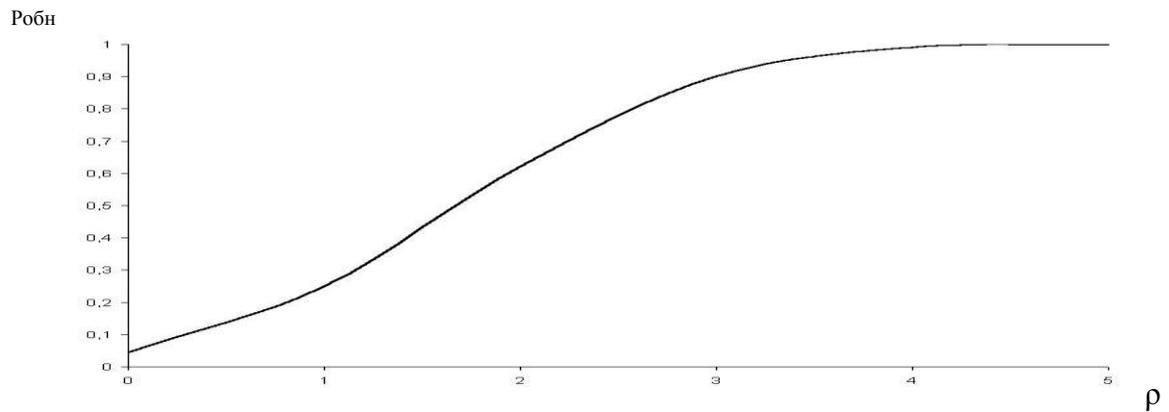


Рис. 3 — график зависимости вероятности обнаружения от отношения сигнал к помехе

### Расчет помехового воздействия лазерного излучения на матричный фотоприемник

Интенсивность помехового излучения лазера на входе ОЭС определим по формуле:

$$P_{вхОЭС} = \frac{\tau_{ЛП} K_{ОМТ} F_L}{\ell^2 \frac{\pi \theta_{вых}^2}{4}} = \frac{\tau_{ЛП} \cdot I_{ЛП}}{\ell^2}, \quad (2)$$

$\ell$  — длина трассы;

$\tau_{ЛП}$  — пропускание атмосферы на трассе;

$K_{ОМТ}$  — пропускание ОМТ лазера;

$F_L$  — мощность лазера;

$\theta_{вых}$  — расходимость излучения на выходе ОМТ;

$I_{ЛП}$  — сила излучения помехового лазера.

Определим мощность для лазерной помехи:

$$F_{вхЛП} = P_{вхЛП} \cdot S_{вх} \frac{\tau_{ЛП} \cdot I_{ЛП}}{\ell^2} \cdot S_{вх}, \quad (3)$$

$S_{вх}$  — площадь входной апертуры.

Предполагая, что

$$\lambda_{\text{лп}} \approx \lambda_{\text{ик}} \approx \lambda_{\text{пр}} \approx 3 \cdot 10^{-4} \text{ см}, \quad \Delta\lambda_{\text{лп}} \approx \Delta\lambda_{\text{ик}} \approx \Delta\lambda_{\text{пр}}; \quad \ell_{\text{ик}} \approx \ell_{\text{лп}}, \quad \tau_{\text{лп}} = 0,77.$$

$\Delta\lambda_{\text{лп}}$  — ширина полосы лазерной помехи;

$\Delta\lambda_{\text{ик}}$  — ширина полосы ИК- источника;

$\Delta\lambda_{\text{пр}}$  — полоса чувствительности приемника.

Излучение ИК источника поглощается парами воды и молекулами газа в воздухе. Величина коэффициента поглощения сильно зависит от высоты. Концентрация водяного пара на высоте 10км практически на два порядка ниже, чем у поверхности Земли.

На графике (рис. 4) представлена зависимость пропускания излучения с длиной волны  $\approx 2,7\text{-}3$  мкм от высоты находящегося источника излучения. Видно, что чем выше источник, тем ближе коэффициент пропускания к 1.

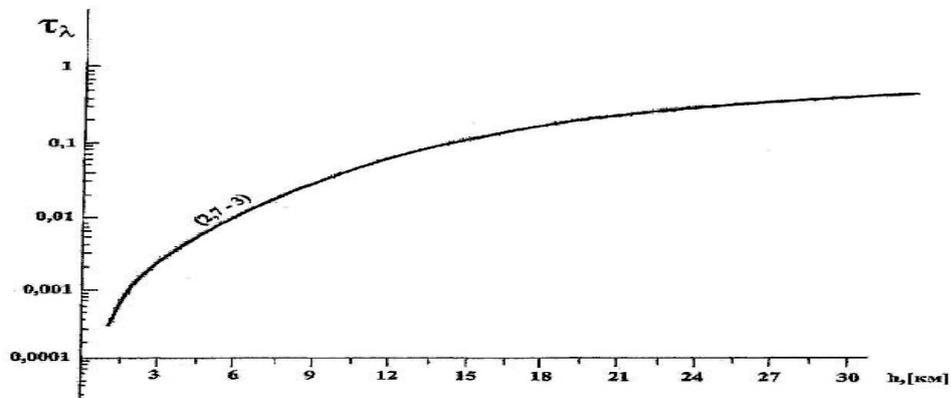


Рис. 4 — Пропускания излучения в атмосфере в зависимости от высоты  
Величина сигнала на чувствительном элементе (ЧЭ)

$$C = F_{\text{вх ик}} \cdot Y,$$

$F$  — мощность сигнала на входной апертуре;

$Y$  — увеличение оптической системы;

$$Y = \frac{S_{\text{вх}}}{S_{\text{чэ}}};$$

$S_{\text{вх}}$  — площадь входной апертуры;

$S_{\text{чэ}}$  — площадь чувствительного элемента.

Помехой на элементе регистрирующим излучение будет дифрагированное излучение помехового лазера. А помеха рассчитывается по формуле  $\Pi = F_{\text{вх}} \cdot \kappa_{\text{св}}$ ,  $\kappa_{\text{св}} = Y \frac{P(\alpha)}{P(0)}$ ,

$\kappa_{\text{св}}$  — коэффициент оптической связи.

С учетом дифракции на входной апертуре  $\frac{P(\alpha)}{P(0)} = 4 \left[ \frac{J_1(ka\alpha)}{ka\alpha} \right]^2$ ,  $\kappa = \frac{2\pi}{\lambda}$ ,

$\alpha$  — угол между направлением сигнала и помехи,  $a$  — радиус входной апертуры

ФПУ. Отношение  $\frac{C}{\Pi}$  определяется выражением  $\frac{C}{\Pi} = \frac{\tau_{ук} \cdot I_{ук} \cdot Y}{\tau_{лп} \cdot I_{лп} \cdot \kappa_{св}}$ .

Окончательно:

$$\frac{C}{\Pi} = \frac{\tau_{ук}}{\tau_{лк}} \frac{P(0)}{P(\alpha)} \frac{I_{ИК}}{I_{ЛП}} \quad (4)$$

$$\alpha = \left[ \arcsin \frac{h-h_i}{h_p} - \arcsin \frac{h}{h_{лп}} \right] \quad (5)$$

$h$  — расстояние ФПУ от земли;

$h_{\phi}$  — расстояние от ФПУ до ракеты;

$h_i$  — расстояние ракеты от земли;

$h_{лп}$  — расстояние от ФПУ до лазера.

В таблице 1 представлены исходные данные и полученные результаты расчета, отношения сил излучения лазерной помехи к регистрируемому источнику при  $\frac{C}{\Pi} = 1$ , что соответствует вероятности обнаружения 0,25.

Таблица 1

	Высота, h	0	1,5	3	10	12	$\geq 20$
Исх. данные	$\tau_{ик}$	$10^{-4}$	$10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-2}$	$10^{-1}$	1
	$\alpha$ рад	0,033	0,03	0,025	0,010	0,01	0,004
	$\frac{P(\alpha)}{P(0)}$	$2 \cdot 10^{-10}$	$3 \cdot 10^{-10}$	$3 \cdot 10^{-10}$	$8 \cdot 10^{-9}$	$10^{-8}$	$8 \cdot 10^{-8}$
Рез-т расчета	$\left( \frac{I_{лп}}{I_{ик}} \right)$	$0,65 \cdot 10^6$	$4,3 \cdot 10^6$	$1,3 \cdot 10^7$	$2 \cdot 10^7$	$1,3 \cdot 10^7$	$1,6 \cdot 10^7$

## Заключение

На основании полученных результатов можно сделать выводы:

— Рассчитан порог ограничения через период ложной тревоги и дисперсию частоты рекомбинационного шума. Дисперсия частоты  $\sqrt{f_u^2} = 10^5 \text{ Гц}$  определена на основе величины времени жизни носителей для приемника HgCdTe. Показано, что минимальное отношение  $\frac{C}{u} = 3$  соответствует вероятности обнаружения сигнала  $P_{\text{обн}}=0,9$ .

— Рассмотрена дифракция на входной апертуре ОЭС в качестве помехи. Определенно отношение силы излучения лазерной помехи к силе излучения ИК источника при  $\frac{C}{u} = 1$  для различных высот (0-20):  $\frac{I_{\text{ПЛ}}}{I_{\text{ИК}}} = 0,65 \cdot 10^6 \div 1,6 \cdot 10^7$ . Вероятность обнаружения в этом случае ( $P_{\text{обн}}=0,25$ ).

## Библиографический список

[1] Осипов В.В.

Предельные характеристики новых смотрящих гибридных ИК- матриц на основе HgCdTe. - изд. "Прикладная физика" №2, Москва, 1999, 452с

[2] S.Borrello

"Photoconductive HgCdTe detector performance with background variations" Infrared Physics, V17 p.121. 1997.

## Сведения об авторе

Корнакова Олеся Владимировна, инженер ОАО «ГСКБ Алмаз-Антей»

19633, г. Москва ул.Новоорловская 16-187, т.8926-164-51-51, [Olesiaka@yandex.ru](mailto:Olesiaka@yandex.ru)