

О НЕОБХОДИМОСТИ ОЦЕНИВАНИЯ СТРУКТУРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ФУНКЦИИ РАССЕЯНИЯ ТОЧКИ ОПТИЧЕСКИХ ТРАКТОВ ТЕПЛОВЫХ ПЕЛЕНГАЦИОННЫХ СТАНЦИЙ

Ерохин Е.В., Макаренко А.В., Правдивцев А.В.

Федеральное космическое агентство РФ
ОАО «НПК «Системы прецизионного приборостроения»
E-mail: avp@rdcn.ru

Введение

Современные тепловые пеленгационные станции (ТПС) с матричными приёмниками излучения (МПИ) имеют высокую обнаружительную и разрешающую способность, как по критерию контраста излучения «объект/фон», так и по угловым координатам. При этом работающая станция обладает высокой скрытностью, в силу пассивного принципа локации объектов. По этим причинам, ТПС для ряда систем, становятся одним из основных источников информации о состоянии окружающей обстановки.

Как показано в работе [1], первичный фильтр обнаружения в современных оптико-электронных системах с МПИ, как правило, работает по структурно-яркостным, структурно-статистическим и геометрическим характеристикам наблюдаемых объектов и фона. При этом геометрические образы наблюдаемых объектов, сформированные на МПИ, в зависимости от их линейных размеров, делятся на три класса [1]:

- «полноценное изображение» – (геометрия объекта искажена, но в целом сохранена), линейные размеры образа свыше 11х11 пикселей;
- «псевдоизображение» – (геометрия объекта ослаблена), линейные размеры образа от 5х5 до 11х11 пикселей;
- «мультиточечное изображение» – (геометрия объекта вырождена), линейные размеры образа от 1х1 до 4х4 пикселей.

Тепловые пеленгационные станции, в силу специфики их функционирования, преимущественно обрабатывают либо «точечное изображение», либо «псевдоизображение»; «полноценное изображение» – для них является исключением.

В связи с этим, наряду с прочими, остро встаёт вопрос о борьбе с искажениями пространственной структуры сигнального отклика, сформированного на выходе с МПИ. Основные причины, порождающие пространственные искажения сигнала:

1. Турбулентность среды распространения излучения.
2. Смаз порождаемый взаимным смещением наблюдаемого объекта и ТПС.
3. Некачественная функция рассеяния точки (ФРТ) оптического тракта.

При этом пространственные искажения сигнального отклика негативно влияют на следующие моменты:

1. Энергия в сигнальном отклике размывается между «объектом» и «фоном», что приводит к понижению яркостного и статистического контраста и искажению угловых размеров объекта. Это в общем случае снижает обнаруживаемость объекта.
2. Энергия в сигнальном отклике перераспределяется между «элементами объекта», что приводит к ошибкам в определении координат объекта, и в общем случае снижает распознаваемость объекта.

Как показал анализ открытых источников научно-технической информации, вопрос об оптимизации оптического тракта оптико-электронных систем ИК диапазона по критерию «качество ФРТ» чаще всего поднимается для тепловизуальных станций (ТВС). Одним из ведущих критериев оптимизации оптического тракта ТВС является так называемая «концентрация энергии в заданной области». Масса публикаций посвящена выбору оптимального размера области. При этом на однородность по полю зрения структурных характеристик ФРТ, в том числе и формы её пика, фактически не обращают внимания. Это связано с тем, что ТВС, как правило, узкопольны (поле зрения менее 40 градусов) и имеют возможность центрировать оптическую ось прибора на наблюдаемый объект. В основном эти системы предназначены для работы с полноценным изображением.

Что касается ТПС, они зачастую являются широкопольными (поле зрения превышает 90 градусов) и лишены возможности переустанавливать оптическую ось на наблюдаемый объект.

В настоящей статье изучаются пространственные искажения сигнала, порождаемые ФРТ оптического тракта. Рассматриваются вопросы связанные с недостаточностью критерия «концентрация энергии в заданной области», для полноценной оптимизации оптических трактов тепловых пеленгационных станций.

2. Постановка задачи

Рассмотрим формирование оптического изображения на матричном приёмнике излучения с учётом функции рассеяния точки оптической системы:

$$E_T^R(x', y') = \frac{1}{s^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} H_{OT}(x' - x, y' - y) L_T(x, y) dx dy, \quad (1)$$

где: E_T^R – распределение освещённости в плоскости изображения F_I ; L_T – распределение яркости наблюдаемого объекта в предметной плоскости F_T ; H_{OT} – импульсная характеристика оптического тракта. Выражение (1) задаёт построение изображения в приближении оптической системы обладающей круговой симметрией и свойством линейности, при $F_I \parallel F_T$. Кроме того, принимается, что функция H_{OT} не зависит от полевого угла. Коэффициент s , задающий геометрический и фотометрический масштабы, имеет вид:

$$s = \frac{l_{RT}}{f'}, \quad f' = \frac{a_{sR}}{\operatorname{tg} 2\omega_{sR}}, \quad (2)$$

где: l_{RT} – дальность до наблюдаемого объекта; f' – заднее фокусное расстояние оптической системы; a_{sR} – длина стороны одного приёмного элемента МПИ; $2\omega_{sR}$ – мгновенное угловое поле зрения одного элемента МПИ (параметр IFOV – Instantaneous Field of View).

Для выполнения закона сохранения энергии, в предположении, что функция светимости L_T имеет энергетический смысл, на функцию H_{OT} накладывается условие нормировки:

$$\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} H_{OT}(x, y) dx dy = 1. \quad (3)$$

Влиянием среды распространения излучения – пренебрегаем. Параметр «fill factor» для МПИ принят равным 1. Он рассчитывается как отношение:

$$R_{ff} = \left(\frac{a_{sR}}{d_{sR}} \right)^2, \quad (4)$$

где d_{sR} – шаг решётки сенсоров МПИ.

Для случая наблюдения «псевдоизображений» требуется изучить необходимость и достаточность критерия «концентрация энергии в заданной области» для полноценной оптимизации качества оптической системы. Критерий имеет вид:

$$\int_{-a}^a \int_{-a}^a H_{OT}(x, y) dx dy = 0.9, \quad (5)$$

где a – половина стороны условного квадрата на МПИ, в который приходится 90 % энергии сигнала отклика. Обычно $a \in [0.3 a_{sR}, a_{sR}]$.

3. Искажение пространственной структуры сигнала отклика

Введём в рассмотрение две типичные ФРТ отвечающие центральной и периферийной областям поля зрения некоей реальной широкоугольной ТПС. Обозначим их соответственно H_1 и H_2 . Вид функций, в логарифмическом масштабе, представлен на рисунке 1.

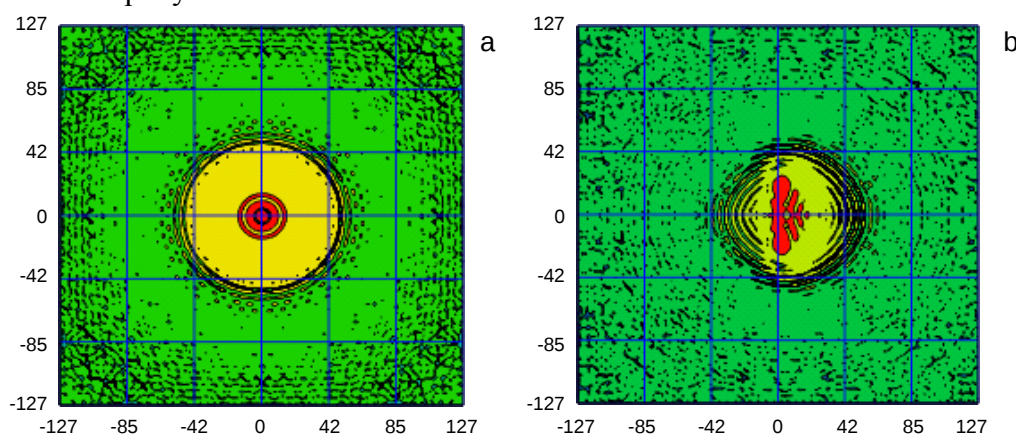


Рис. 1. ФРТ областей оптического тракта: а – H_1 , б – H_2 .

Отметим, что обе, приведённые на рисунке 1, ФРТ удовлетворяют условию (5) при $a = a_{sR}$. Введём также в рассмотрение три тестовых объекта наблюдения: **А** – диск, **В** – Т-образная фигура, **С** – укороченная Т-образная фигура. Объекты расположены на неизлучающем фоне и имеют постоянную по площади яркость. Угловой размер наблюдаемых объектов подобран так, чтобы на МПИ формировалось их «псевдоизображение» близкое к «мультиточечному». Изображения этих объектов, для ФРТ H_1 и H_2 , отбелённые по порогу 0.4, приведены на рисунке 2. Визуально видно, что в периферийной области пространственная структура сигнала отклика значительно искажается. Количественно этот вывод подтверждается данными табл. 1.

Таблица 1

Искажение пространственной структуры сигнала отклика

Критерий	Объект А	Объект В	Объект С
ΔS (площадной)	0.10	0.14	0.20
ΔT (топологический)	0.33	0.50	0.50

Критерий ΔS – это прирост площади изображения, а ΔT – прирост количества углов на изображении, при переходе от ФРТ H_1 к H_2 . Критерии рассчитывались по отбелённым изображениям. Анализ ΔT показывает, что ошибка второго рода, для алгоритмов распознавания формы объектов, на периферии возрастает.

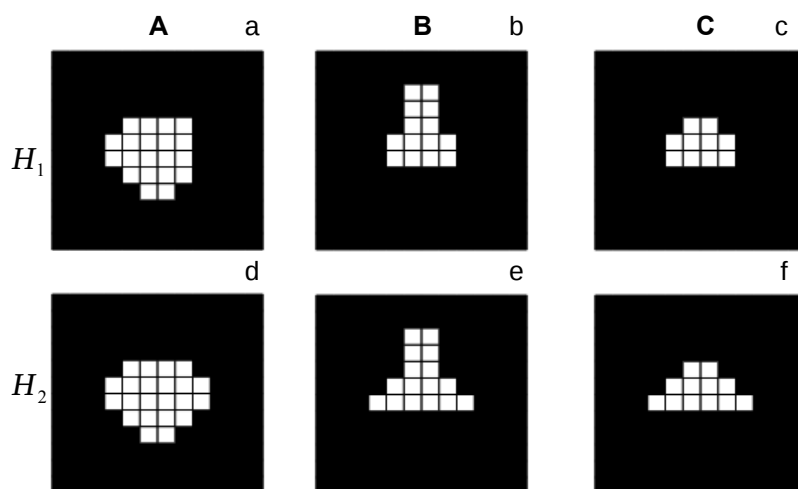


Рис. 2. Изображения тестовых объектов для ФРТ H_1 и H_2 .

На рисунке 3 приведены гистограммы распределения количества пикселей по нормированной на единицу освещённости, для полутоновых изображений объектов А, В, С и ФРТ H_1 и H_2 . Пунктирной линией показана граница отбеливания, уровень 0.4.

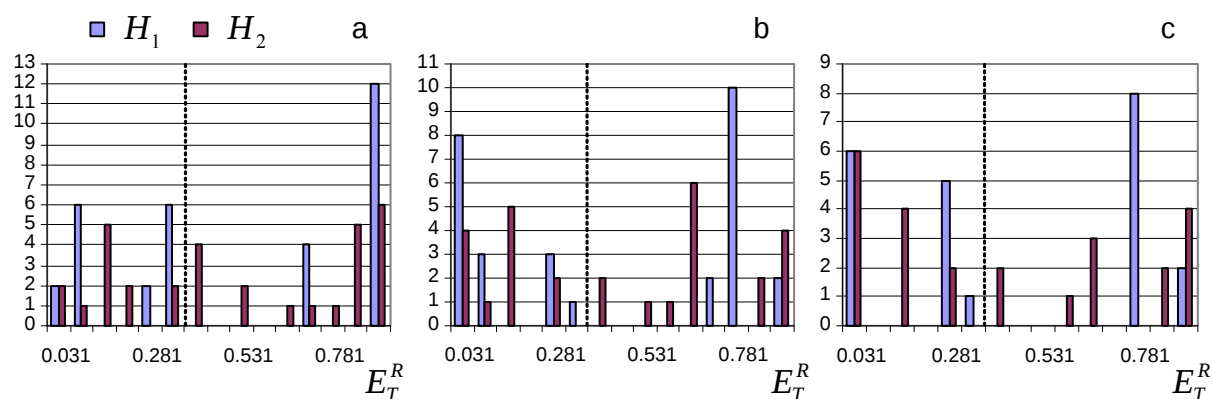


Рис. 3. Гистограмма распределения кол-ва пикселей по освещённости: а – А, б – В, с – С.

Данные гистограмм (см. рисунок 3) также подтверждают, что в периферийной области пространственная структура сигнала значительно искажается.

Выводы

В настоящей статье продемонстрирована недостаточность критерия «концентрация энергии в заданной области» для полноценной оптимизации оптических трактов тепловых пеленгационных станций. В этом случае остаётся реальная возможность бесконтрольного искажения пространственной структуры сигнала в периферийной области поля зрения ТПС. Это ведёт к снижению обнаружительной способности системы, и к ошибкам распознавания наблюдаемых объектов.

Следовательно, требуется разработка критерия оценивания структурной однородности ФРТ оптических трактов тепловых пеленгационных станций.

Литература

1. Макаренко А.В., Правдивцев А.В. и др. Принципы синтеза алгоритмов обнаружения целей пассивными оптико-локационными станциями расположенными на подвижных носителях. // Международная конференция «Прикладная оптика-2008» / Сборник докладов. – Санкт-Петербург, ИТМО, 2008.