

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ИНФРАКРАСНЫХ СРЕДСТВ МОНИТОРИНГА ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

д. т. н., проф. И. Н. Белоглазов, к. т. н. Ю. Г. Веселов, д. т. н. С. П. Гулевич,
И. В. Карников

Использование оптических полей Земли видимого, теплового диапазонов электромагнитного спектра, измеряемых оптико-электронными средствами мониторинга земной поверхности, позволяет решать автономно, в пассивном режиме многие задачи, стоящие перед летательными аппаратами. Например, задачу использования геофизических полей для навигации в рамках системы предупреждения столкновения с Землей и автоматической посадки.

Оперативное решение этих задач связано с необходимостью иметь цифровые модели физических полей Земли оптического диапазона в виде карт этих полей и эталонов участков местности [1].

В современных условиях к мониторингу земной поверхности предъявляются такие основные требования как непрерывность, своевременность, достоверность и полнота получаемых данных, высокая точность определения координат.

Большинству этих требований отвечают оптико-электронные средства (ОЭС) видимого диапазона. При изменении условий погоды, ухудшения метеорологической дальности видимости, возникающего за счет таких явлений погоды как туман, дымка, осадки возможности по использованию данных средств сильно ограничены [2].

Известно, что необходимость выполнения автоматической посадки летательных аппаратов (ЛА) возникает не только в простых, но и, зачастую, в сложных метеорологических условиях.

Важно заметить, что степень ухудшения качества инфракрасного изображения по причине ухудшения метеорологических условий в большинстве случаев намного меньше, чем ухудшение качества изображения ОЭС, работающей в видимом диапазоне.

Также традиционно используемые средства маскировки военной техники, оказываются малоэффективными при использовании инфракрасных средств мониторинга земной поверхности в военных целях. На рис. 1 и 2 соответственно показаны изображения одних и тех же объектов, но на рис. 1 изображение получено ОЭС видимого диапазона, на рис. 2 - инфракрасной станцией (ИКС).



Рис. 1. Изображение, полученное в видимой области спектра



Рис. 2. Изображение, полученное в ИК диапазоне

В настоящее время в связи с существенным улучшением характеристик ОЭС ИК-диапазона во всем мире растет интерес к этим системам.

Основным элементом инфракрасной ОЭС является детектор ИК-излучения, который используют для поглощения ИК-излучения и преобразования этого излучения в электронные сигналы, на основе которых и формируется изображение.

Необходимо отметить, что особенностью работы ИКС является малая энергия квантов ИК-излучения. Например, фотон, соответствующий

середине диапазона $\Delta \lambda = 8 \dots 14$ мкм, имеющий длину волны $\lambda = 11$ мкм, обладает энергией в 20 раз меньшей энергии фотона с $\lambda = 0,55$ мкм, соответствующей примерно середине видимого диапазона длин волн.

Приемники ИК-излучения при комнатной температуре имеют большие собственные шумы, поэтому их приходится охлаждать. Причем, чем больше средняя длина волны диапазона, тем ниже должна быть температура приемника излучения. Например, для $\Delta \lambda = 3 \dots 5$ мкм температура приемника излучения составляет 80...90 К в зависимости от конструкции и состава приемника, а для $\Delta \lambda = 8 \dots 14$ мкм - 4...80 К [3].

Для обеспечения высокой детальности ИКС необходимо иметь малые размеры элементарного приемника излучения, а также малую его инерционность. С уменьшением размера элементарного приемника излучения ИКС и его инерционности увеличивается вероятность обнаружения и распознавания объектов мониторинга земной поверхности.

Существуют два основных вида детекторов: детекторы прямого детектирования и детекторы тепло-детектирования.

Детекторы прямого детектирования (охлаждаемые) работают на принципе прямого преобразования фотонов в электроны. К этой категории относятся многие применяемые сегодня детекторы на основе материалов: PbS , PbSe , HgCdTe, InSb , PtSi , GaAs и т.д. На рис. 3 представлен один из охлаждаемых детекторов прямого детектирования [4].

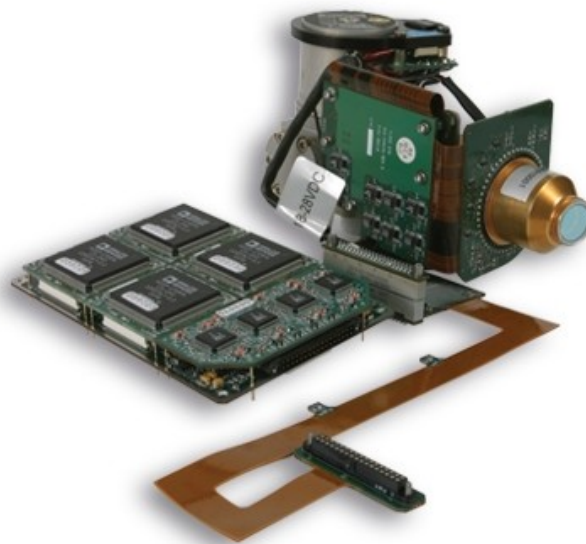


Рис. 3. Охлаждаемый приемник ИК-излучения EYE-Z640

Основные преимущества охлаждаемых детекторов:

- высокочувствительные элементы позволяют получить изображение высокого качества (обладают высоким энергетическим разрешением) [4];
- позволяют работать с камерами, имеющими большие фокусные расстояния.

Основные недостатки охлаждаемых детекторов:

- относительно высокая потребляемая мощность;
- относительно долгое время охлаждения для выхода на рабочий режим (6-7 минут);
- относительно высокая цена по сравнению с неохлаждаемыми из-за наличия системы охлаждения;
- относительно большие габариты и вес по сравнению с неохлаждаемыми приемниками ИК-излучения (рис. 4, 5).



Рис. 4. Охлаждаемая ИКС CARMEL



Рис. 5. Охлаждаемая ИКС EYE-LITE

Детекторы тепло-детектирования используют для создания ИК-изображения побочные эффекты, такие как соотношения между проводимостью, емкостным сопротивлением и температурой детектора. К этой категории относятся микро-болометры, термопары и т.д. Детекторы этой категории, в большинстве случаев, не охлаждаются вообще, или же их температура стабилизируется в рамках $\pm 30^{\circ}\text{C}$. Такие детекторы работают, как правило, в диапазоне 8-12 мкм (рис. 6, 7, 8, 9).

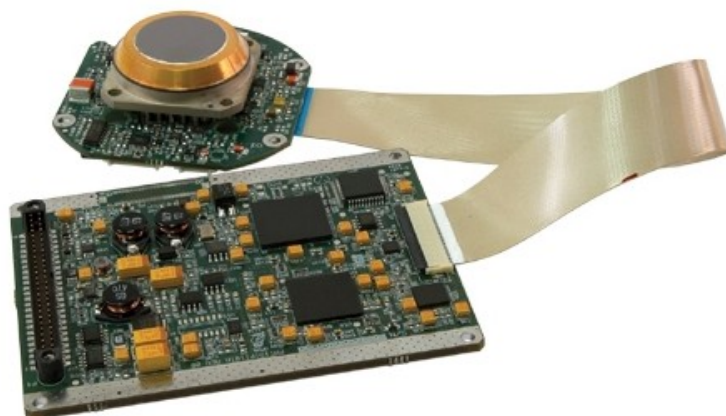


Рис. 6. Неохлаждаемый приемник ИК-излучения EYE-M35

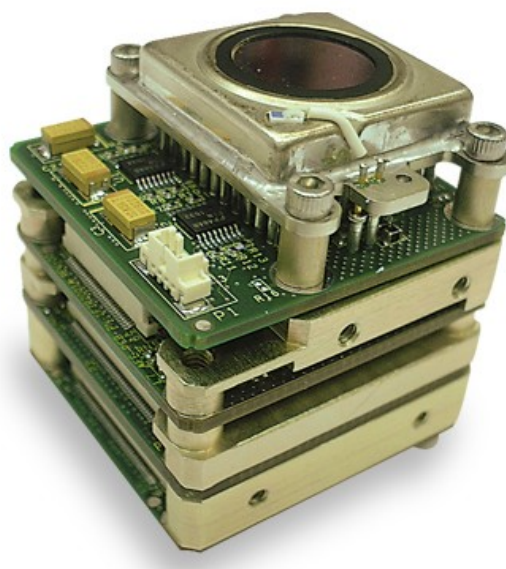


Рис. 7. Неохлаждаемый приемник ИК-излучения EYE-R25

Основные преимущества неохлаждаемых детекторов:

- небольшие габариты и вес;
- обеспечивают немедленную картинку сразу после включения;
- низкая потребляемая мощность;
- более высокая наработка на отказ по сравнению с охлаждаемыми приемниками ИК-излучения;
- относительно невысокая цена по сравнению с охлаждаемыми.

Основные недостатки неохлаждаемых детекторов:

- низкая чувствительность не позволяет получить изображение, сравнимое по качеству с охлаждаемыми детекторами;
- неэффективны для работы с длиннофокусной оптикой.



Рис. 8. Неохлаждаемый приемник ИК-излучения EYE R640



Рис. 9. Неохлаждаемая ИКС MERON

Также можно отметить, что при использовании в ИКС неохлаждаемых детекторов 90% стоимости ИКС приходится на ее оптическую составляющую.

Традиционно сравнительная оценка ОЭС осуществляется посредством сопоставления эффективности их применения.

Одним из наиболее информативных показателей эффективности ИКС является линейное разрешение на местности. Чем меньше значение линейного разрешения на местности, тем выше разрешающая способность

системы и соответственно вероятность распознавания до заданного класса, вида, типа объектов мониторинга земной поверхности [5].

Для расчета линейного разрешения на местности L_M кадровых ИКС можно применить следующие соотношения [3]:

$$L_M = a \frac{H}{f}$$

$$R = \frac{1}{2a},$$

где H - высота полета носителя;

f - фокусное расстояние ИКС;

R - разрешающая способность;

a - размер элементарного приемника излучения (пиксела).

На рис. 10 изображены графики зависимости линейного разрешения на местности от высоты полета носителя H для неохлаждаемой ИКС GIMBOA при двух разных размерах элементарного приемника излучения 25 и 35 мкм (два варианта комплектации), соответственно $L1(H)$, $L2(H)$ при фокусном расстоянии $f=150$ мм [6].

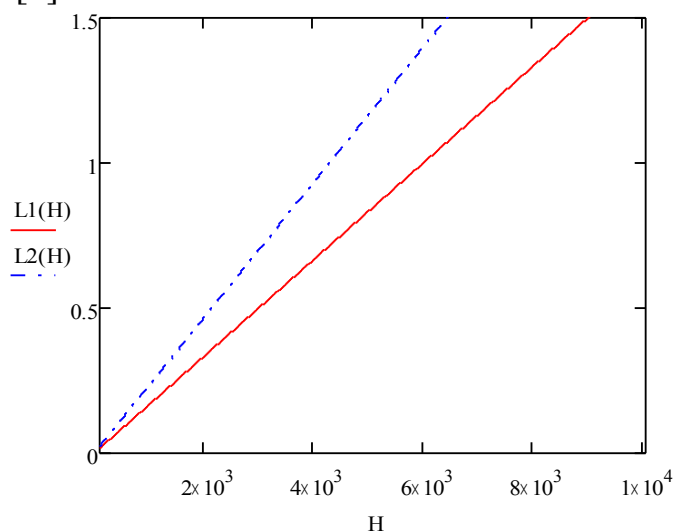


Рис. 10. Графики зависимости линейного разрешения $L(H)$, м на местности от высоты полета носителя H , м для неохлаждаемой ИКС GIMBOA

На рис. 11 изображены графики зависимости линейного разрешения на местности L_M , м от высоты полета для охлаждаемой ИКС CARMEL при двух разных размерах элементарного приемника излучения 15 и 30 мкм (два

варианта комплектации), соответственно $L3(H)$, $L4(H)$ при фокусном расстоянии $f=275$ мм [6].

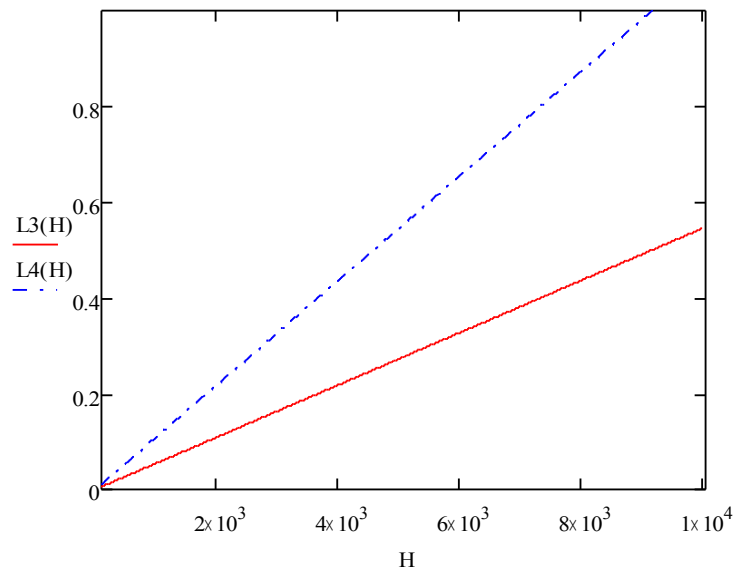


Рис. 11. Графики зависимости линейного разрешения на местности $L(H)$, м от высоты полета H , м для охлаждаемой ИКС CARMEL

Графики строились с выбором максимально возможных значений фокусных расстояний, соответственно, для неохлаждаемой ИКС GIMBOA $f=150$ мм охлаждаемой ИКС CARMEL $f=275$ мм. Как видно из полученных графиков параметрами, влияющими на линейное разрешение на местности ИКС, являются размер элементарного приемника излучения, фокусное расстояние, высота полета носителя. Линейное разрешение на местности охлаждаемых ИКС значительно лучше, чем неохлаждаемых ИКС, за счет использования длиннофокусных оптических систем и приемников излучения с более мелкими размерами. На рис. 12 показан сравнительный анализ ИКС, для которого использовались охлаждаемая ИКС CARMEL с параметрами $a=15$ мкм, $f=275$ мм $L1(H)$ и неохлаждаемая ИКС GIMBOA при $a=25$ мкм, $f=150$ мм $L2(H)$ [6].

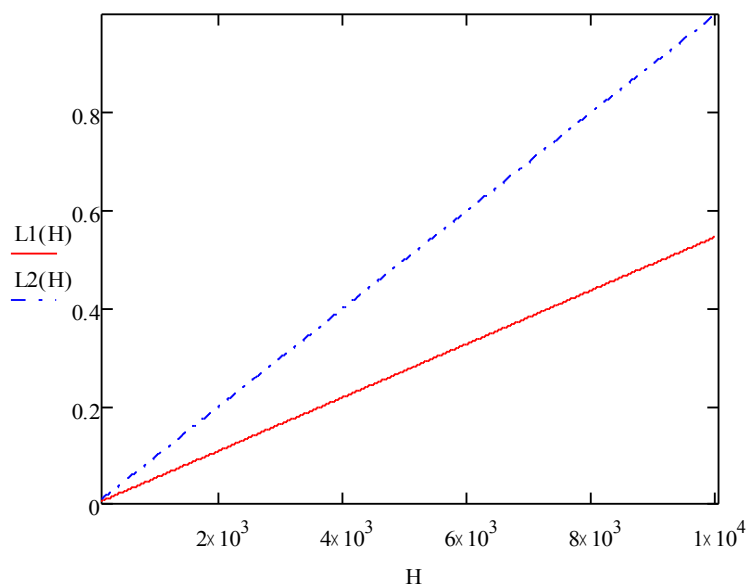


Рис. 12. Графики зависимостей линейного разрешения на местности от высоты полета H , м соответственно $L1(H)$, м для охлаждаемой ИКС CARMEL и $L2(H)$, м неохлаждаемой ИКС GIMBOA

Из анализа полученных зависимостей следует, что линейное разрешение на местности у охлаждаемой ИКС на 45% выше, чем у неохлаждаемой, за счет меньшего, чем у последней, на 10 мкм размера элементарного приемника излучения, и за счет того, что на охлаждаемую ИКС установлена более длиннофокусная оптика.

Установка длиннофокусной оптики на охлаждаемые системы делает их более эффективными при съемке на больших высотах. В то же время, неохлаждаемые системы достаточно эффективны для применения на небольших высотах съемки.

Охлаждаемые ИКС, работающие с использованием приемников ИК-излучения HgCdTe, по сравнению с неохлаждаемыми обладают меньшими значениями температурного (энергетического) разрешения ($\Delta T \approx 7...16$ мК), это обусловлено их высокой квантовой эффективностью. Однако технология изготовления таких приемников очень сложна, их стоимость резко возрастает по мере увеличения формата матрицы.

Известно, что спектральный диапазон у охлаждаемых ИКС с приемниками PtSi, имеющий энергетическое разрешение $\Delta T \approx 33...90$ мК, равен 3...5 мкм. При понижении температуры наблюдаемой сцены из-за спада спектральной характеристики значение ΔT в этом диапазоне возрастает. Технология изготовления приемников PtSi достаточно проста и обеспечивает высокую однородность параметров отдельных пикселей.

Энергетическое разрешение у ИКС с приемниками InSb имеет значение $\Delta T \approx 10...100$ мК, стоимость изготовления таких приемников излучения выше, чем у PtSi, но ниже чем у HgCdTe.

У ИКС с неохлаждаемыми микроболометрическими приемниками излучения энергетическое разрешение находится в диапазоне $\Delta T \approx 80 \dots 100$ мК. Отсутствие системы охлаждения упрощает конструкцию ИКС в целом, снижает их стоимость, массу, энергопотребление, время готовности к работе, увеличивает надежность и срок службы системы [7].

Развитие малогабаритных неохлаждаемых детекторов излучения особенно актуально для установки ИКС на беспилотные ЛА, так как к последним предъявляются особенно жесткие требования по максимальной полезной нагрузке и они должны иметь относительно невысокую цену. А особенности неохлаждаемых детекторов в комплексе с особенностями летных характеристик беспилотных ЛА (небольшие высоты полета и т. д.) дают в комплексе оптимальные условия для ведения мониторинга земной поверхности. Детальность, которую обеспечивают неохлаждаемые ИКС, вполне достаточна для применения их в системе автоматической посадки, обеспечивая высокую эффективность работы корреляционно-экстремальных алгоритмов.

Можно выделить основные тенденции развития инфракрасных средств мониторинга земной поверхности:

- повышение углового и энергетического разрешения;
- создание двух- и многодиапазонных ИК-систем;
- модульный принцип построения системы, унификация ее основных узлов;
- уменьшение габаритов, массы и энергопотребления;
- создание многофункциональных по своему назначению систем;
- интеграция ИКС с другими датчиками и системами, решающими общую задачу;
- широкое использование методов компьютерного моделирования в процессе разработки, испытаний и исследований ИКС [7];

На улучшение характеристик ИКС, наряду с созданием матричных приемников излучения (МПИ) высокого разрешения и большого формата, заметное влияние оказывает разработка новых полноформатных ПЗС - и КМОП - схем считывания и первичной обработки сигналов с отдельных элементов МПИ [7].

Инфракрасные станции мониторинга земной поверхности являются дорогостоящими устройствами, их цена колеблется от 20 до 100 тыс. \$. На стоимость ИКС влияют технические характеристики, такие как тип детектора, размер элементарного приемника излучения, размер матрицы, энергетическое и угловое разрешение.

В заключение нужно отметить, что дальнейший прогресс в развитии инфракрасных систем мониторинга земной поверхности ожидается в связи с совершенствованием малогабаритных неохлаждаемых двумерных МПИ, появлением новых оптических материалов и элементов, снижением массы, габаритов и энергопотребления и, конечно же, с уменьшением стоимости этих систем.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ,

Литература

1. Автоматизированные системы наземных комплексов сбора и обработки данных воздушной разведки/ под редакцией *И. Н. Белоглазова*. - М.: ВВИА им. проф. Н. Е. Жуковского, 2003.
2. *Филиппов В. Л., Макаров А.С., Иванов В. П.* Оптическая погода в нижней тропосфере. – Казань: «Дом печати», 1998.
3. *Коваленко В. П.* Оптико-электронное разведывательное оборудование летательных аппаратов. – М.: ВВИА им. проф. Н. Е. Жуковского, 1990.
4. Справочник по инфракрасной технике. под редакцией *У. Вольф, Г. Цисис*. – М.: Мир, 1999.
5. *Тихонычев В. В., Коваленко В. П., Халтобин В. М., Веселов Ю. Г.* Оценка параметров контроля технического состояния цифровых инфракрасных средств аэрокосмической съемки. - Звездный городок: РИО РГНИИ ЦПК им. Ю.А. Гагарина, 2005.
6. Сайт www.orgal.com
7. *Тарасов В. В., Якушенков Ю. Г.* Инфракрасные системы «смотрящего типа». – М.: Логос, 2004.