

Результаты исследований пространственной структуры излучения атмосферы в спектральном диапазоне 1,5–2 мкм

А.М. МИЩЕНКО^{1*}, С.С. РАЧКОВСКИЙ², В.А. СМОЛИН²,
И.В. ЯКИМЕНКО²

¹ Военная академия войсковой ПВО ВС РФ имени Маршала Советского

Союза А.М. Василевского (ВА ВПВО ВС РФ)

² Филиал «НИУ «МЭИ» в г. Смоленске, Смоленск

* E-mail: kucu@mail.ru

Аннотация

Представлены результаты экспериментальных исследований пространственной структуры излучения неоднородностей атмосферного фона и объекта обнаружения – беспилотного летательного аппарата, а также рассмотрен вопрос о возможности его обнаружения с помощью оптико-электронных систем на фоне облачного поля в ближнем ИК диапазоне длин волн.

Ключевые слова: оптико-электронные системы, экспериментальные исследования, пространственная структура излучения неоднородностей, атмосфера, ИК-диапазон.

Последние публикации по исследованию излучения облачных полей атмосферы касаются среднего (3–5 мкм) и дальнего (8–13 мкм) ИК диапазонов длин волн (ДДВ) [1–5]. В ряде зарубежных источников приведены данные космических исследований в ИК области спектра по составу атмосферы и предсказанию погоды [6–10]. Данные же по излучению атмосферы в ДДВ 1,5–2 мкм в публикациях практически отсутствуют, тормозя решение актуальной задачи обнаружения беспилотных воздушных судов (БВС) пассивными оптико-электронными системами.

В связи с этим авторами разработана методика экспериментальных исследований пространственной структуры излучения неоднородностей атмосферы в ДДВ 1,5–2 мкм при различных типах облачности. Эти исследования проводятся в два этапа:

- фиксация (измерение) флуктуации энергетической яркости (ЭЯ) атмосферы в средней полосе России в зимне-весенний период в утренние часы;

- обработка результатов в интересах получения статистических моделей, описывающих закономерности пространственной структуры флуктуации ЭЯ облачных полей.

Для фиксации флуктуации ЭЯ облачных полей разработан измерительно-вычислительный комплекс (ИВК), основным элементом которого является радиометр на ДДВ 1,5–2 мкм [11], содержащий: объектив (телескоп Кассегрена); вращаемый обтюратор, приводимый в движение с помощью шагового двигателя; интерференционный фильтр, имеющий полосу (ДДВ) пропускания 1,5–2 мкм; фоторезистор (на основе *PbS*); электронную часть (предусилитель, масштабный усилитель, фильтр нижних частот, аналого-цифровой преобразователь, микроконтроллер, флеш-память).

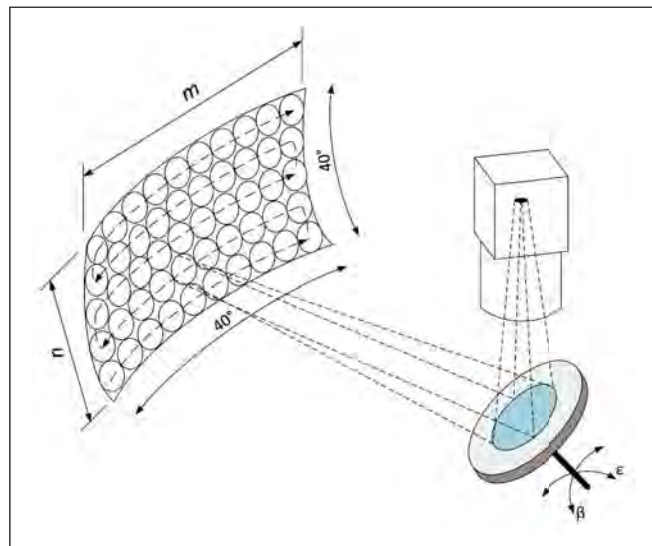
Для оценки параметров радиометра проведены калибровочные работы с целью: определения мгновенного поля зрения; построения градуировочных вольт-температурных характеристик; построения градуировочных вольт-ваттных характеристик и определения коэффициентов передачи ка-

налов радиометра; оценки пороговой чувствительности; оценки ожидаемых погрешностей измерений.

В результате проведенных работ определены следующие характеристики радиометра: ширина поля ($20' \times 20'$); градуировочная вольт-температурная характеристика; вольт-ваттная характеристика; спектральная характеристика в ДДВ 1,55–1,93 мкм; коэффициент передачи канала радиометра ($5,324 \cdot 10^7 \text{ В} \cdot \text{см}^2 \cdot \text{ср} / \text{Вт}$); пороговая чувствительность по ЭЯ ($6,411 \cdot 10^{-10} \text{ Вт} / (\text{см}^2 \cdot \text{ср})$); погрешность измерения ЭЯ (10 %).

Управление шаговыми двигателями обтюратора и зеркалом сканирующей системы (рис. 1) осуществляется микроконтроллером. Команды, через цифровые входы (выходы) последнего, поступают в блок управления. Сектор сканирования выбранного фрагмента атмосферного фона (растра) обеспечивается в пределах до 40° по азимуту и $10\text{--}50^\circ$ по углу места. Сканирующее зеркало обеспечивает проход одной строки кадра в выбранном фрагменте атмосферного фона за 5 с. За это время через каждые $30'$ регистрируется 80 значений ЭЯ этого фона. По завершении сканирования строки кадра подается сигнал на шаговый двигатель, зеркало меняет угол наклона на 1° и сканирование повторяется в обратном направлении. Через заданное число шагов (строк) шаговые двигатели возвращают сканирующее зеркало в исходное начальное положение, происходит запись отснятого кадра на съёмный флеш-носитель, цикл повторяется и записывается следующий кадр.

Рис. 1. Схема сканирования облачного поля



Статистическая обработка результатов измерений флуктуаций ЭЯ облачного поля проводилась по окончании серии измерений, состоящей в создании пачки кадров (растров), в среднем по 30 шт. Всего было исследовано 9 типов облачных полей в дневных условиях: кучевой (Cu) 1–3 балла – 87 шт.; кучевой (Cu) 4–6 баллов – 91 шт.; кучевой (Cu) 7–9 баллов – 93 шт.; слоисто-кучевой (Sc) – 84 шт.; высококучевой (Ac) – 73 шт.; перисто-кучевой (Cc) – 85 шт.; слоистый (St) – 123 шт. и перисто-слоистый (Cs) – 118 шт., ясного неба – 117 шт. Итого получен 871 кадр облачных полей.

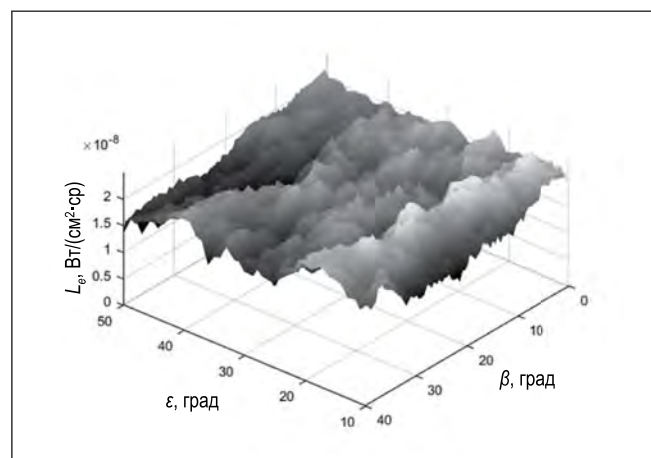
Любой такой кадр представляет собой фоновое изображение (ФИ) в виде двумерного массива, каждый элемент которого содержит информацию об уровне ЭЯ облачного поля в выбранном направлении. Массивы ФИ можно представлять совокупностью строк и столбцов (матрично), изображением в оттенках серого или в виде потенциального рельефа, отражая этим пространственную структуру излучения неоднородностей атмосферы.

Обработка полученных ФИ проводится с целью получения статистических моделей, описывающих закономерности пространственной структуры флуктуаций ЭЯ облачных полей атмосферы. Результаты обработки ФИ показали, что из-за зависимых от метеоусловий термодинамических и турбулентных атмосферных процессов формируются излучающие неоднородности облачных полей атмосферы, имеющие свои угловые размеры и зависящие от вида и балла облачности, метеорологической ситуации и времени суток.

Результаты накапливаются после обработки пачками кадров ФИ разных типов облачных полей и представляются матрично или в виде потенциального рельефа распределения средних значений и дисперсий (среднеквадратических отклонений (СКО)). Полученные модели можно считать статистическими первого типа, описывающими закономерности пространственной структуры флуктуаций ЭЯ облачных полей атмосферы названных типов.

Анализ полученных статистических моделей ЭЯ облачных полей показал, что кучевая облачность (Cu) содержит мелкомасштабные неоднородности (рис. 2). Это объясняется тем, что облачное поле типа Cu име-

Рис. 2. Статистическая модель в виде потенциального рельефа распределения средних значений флуктуаций энергетической яркости (L_e) кучевой облачности (Cu) 4–6 баллов



ет большую вертикальную протяжённость и в верхних слоях содержит кристаллы льда, а в нижних – капли воды. Как известно [12], отражающая способность кристаллов льда в ДДВ 1,5–2 мкм выше, чем у капель воды. Кроме того, небольшое повышение средних значений и СКО флуктуаций ЭЯ облачного поля типа Cu в пригоризонтной области объяснимо влиянием отражения излучения от земли и артефактов, расположенных на её поверхности.

Средние значения и дисперсии (СКО) ЭЯ облачного поля высококучевой облачности (Ac) увеличиваются с ростом угла места. Это объясняется тем, что облачное поле Ac образуется на больших высотах и состоит из кристаллов льда, обладающих высокой отражающей способностью в ДДВ 1,5–2 мкм, а в пригоризонтной области увеличивается влияние атмосферы, содержащей аэрозоль, поглощающий часть излучения.

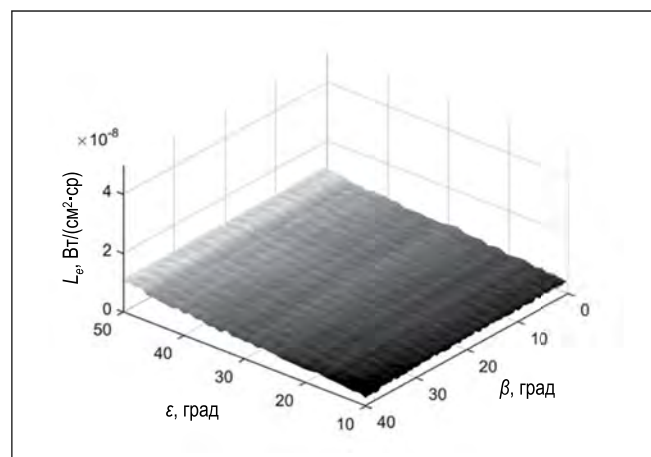
У слоисто-кучевой облачности (Sc) средние значения и дисперсии (СКО) ЭЯ растут с ростом угла места. Это объясняется тем, что облачное поле типа Sc имеет небольшую высоту об-

разования и в основном состоит из капель воды, концентрация которых увеличивается в пригоризонтной области и которые в значительной мере поглощают излучение с ДДВ 1,5–2 мкм [12].

В ходе анализа полученных статистических моделей ЭЯ облачного поля слоистой облачности (St) выявлено, что средние значения и дисперсии (СКО) увеличиваются с ростом угла места (рис. 3). Это объясняется тем, что облачное поле St имеет небольшую высоту образования и в основном состоит из капель воды, концентрация которых увеличивается в пригоризонтной области и которые в значительной мере поглощают рассматриваемое излучение [12].

Средние значения и дисперсии (СКО) ЭЯ облачного поля пористо-слоистой облачности (Cs) повышаются с ростом угла места. Это объясняется тем, что облачное поле типа Cs образуется на больших высотах и состоит из кристаллов льда, обладающих высокой отражающей способностью в ДДВ 1,5–2 мкм, которая падает с уменьшением угла места, так как увеличивается расстояние меж-

Рис. 3. Статистическая модель в виде потенциального рельефа распределения средних значений флуктуаций энергетической яркости (L_e) слоистой облачности (St)



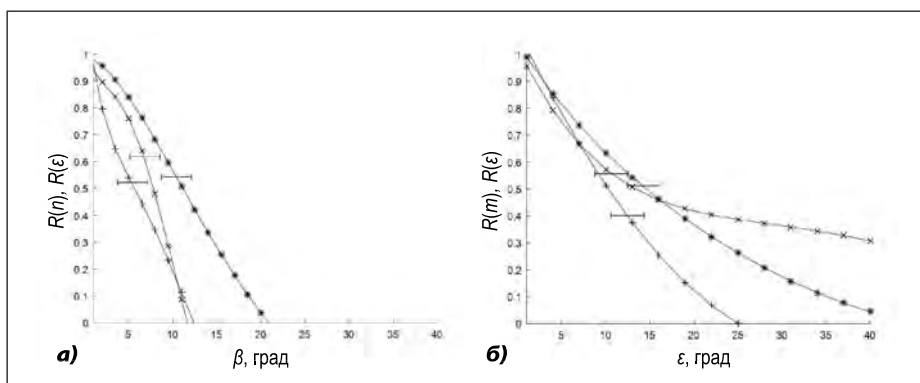


Рис. 4. Зависимости коэффициента пространственной корреляции фонового изображения от углового сдвига по строкам (а) и столбцам (б)

ду ИВК и облаками и, следовательно, ослабевает излучение из-за поглощения атмосферой. Сравнительно небольшая ЭЯ объясняется тем, что по своей структуре облака типа Cs почти прозрачны.

Анализ полученных статистических моделей ясного неба, скрытого в утренней дымке, показал высокий уровень сигнала. Это объясняется тем, что, несмотря на большое количество капель воды, определяющее состав дымки, оптическая толщина последней недостаточна для сильного поглощения излучения, как, например, в случае облачности St. Рост средних значений и дисперсии (СКО) с ростом угла места объясняется уменьшением оптической толщины дымки, поглощающей излучение.

Измеряемые ЭЯ в случае ясного неба находятся на уровне собственных шумов радиометра. Низкий уровень сигнала, в основном, обусловлен почти полным поглощением измеряемого излучения и слабым отражением из-за низких концентраций аэрозоля в пригоризонтной области и ледяных частиц в верхних слоях атмосферы.

Таким образом, анализ первого типа статистических моделей, представленных в виде зависимостей средних значений и СКО флуктуаций ЭЯ облачных полей от угла наблюдения, показал, что интенсивность излучения зависит от высоты образования, состава облаков (кристаллы льда или капли воды) и концентрации частиц (кристаллы льда или капли воды). Если облака расположены высоко, они в основном состоят из кристаллов льда, которые обладают высокой отражающей способностью в ДДВ 1,5–2 мкм, и потому с увеличением угла места наблюдается рост средних значений и СКО флуктуаций ЭЯ

облачного поля. Если же облака расположены низко, они в основном состоят из капель воды, которые сильно поглощают излучение, из-за чего средние значения и СКО флуктуаций ЭЯ облачного поля оказываются невелики. Кроме того, небольшой рост средних значений и СКО флуктуаций ЭЯ облачных полей, имеющих большую вертикальную протяжённость, в пригоризонтной области (Cu), объясним эффектом отражения излучения от земли и артефактов (строений, деревьев и т.п.), расположенных на её поверхности. Зависимость средних значений и СКО флуктуаций ЭЯ облачных полей от азимутальных углов наблюдалась при некоторых типах облачности: кучевом (Cu), кучево-дождевом (Cb), высококучевом (Ac), перисто-кучевом (Cc) и перистом (Ci)).

Кроме того, анализ полученных статистических моделей показал, что в зависимости от размера неоднородностей облачные поля можно разделить на две группы. В первую входят те типы облачных полей, которые содержат мелкомасштабные неоднородности: кучевой (Cu), кучево-дождевой (Cb), высококучевой (Ac), перисто-кучевой (Cc) и перистый (Ci), а во вторую – крупномасштабные неоднородности, размер которых больше размеров получаемых кадров: слоистый (St), слоисто-дождевой (Ns), слоисто-кучевой (Sc), высокослоистый (As) и перисто-слоистый (Cs).

Анализ статистических моделей первого типа позволяет представить лишь характер изменений в зависимости от угла места наблюдения, что не позволяет судить об угловых размерах неоднородностей облачных полей.

Для оценки масштабности этих неоднородностей необходим корреляционный анализ моделей первого типа

ФИ разных типов облачных полей. Анализ включает расчёт коэффициентов взаимной (пространственной) корреляции R и оценку их зависимости от углового сдвига в двух направлениях – по строкам, а затем по столбцам. Полученные зависимости (рис. 4) можно назвать статистическими моделями второго типа, отражающими закономерности пространственной структуры флуктуаций ЭЯ и позволяющими оценивать угловые размеры неоднородностей облачных полей по значению радиуса корреляции (угловые значения, соответствующие уровню $0,5 \cdot R$).

Проведённый анализ показал, что поля слоистого (St), слоисто-кучевого (Sc), слоисто-дождевого (Ns) и перисто-слоистого (Cs) типов облачности можно отнести к имеющим крупномасштабные неоднородности – более 30° . Анализ пространственных корреляционных связей для кучевого типа облачности (Cu) показал, что размеры неоднородностей по углу места примерно одинаковы для всех баллов облачности и равны $7-18^\circ$. В азимутальной плоскости размеры неоднородностей имеют схожие размеры $5-15^\circ$.

Обобщённый анализ всех типов статистических моделей позволил выявить ряд особенностей яркостных характеристик облачных полей в ДДВ 1,5–2 мкм:

1. По статистическим моделям, распределения средних значений и СКО флуктуаций ЭЯ облачных полей (первого типа) обнаруживают тенденцию к росту интенсивности излучения с ростом угла места наблюдения и зависят от высоты образования, состава облаков (кристаллы льда или капли воды) и концентрации частиц (кристаллы льда или капли воды). Кроме того, они позволяют разделять облачные поля по их ЭЯ на два типа – с мелкомасштабной структурой и с крупномасштабными неоднородностями.

2. Пространственные корреляционные функции флуктуаций ЭЯ облачных полей имеют значимые коэффициенты пространственной корреляции между соседними строками ($R_{n, n-1} \approx 0,9$) и столбцами ($R_{m, m-1} \approx 0,9$) ФИ. А потому, как только в соседней строке появляется точечный объект (например, изображение БВС), излучающий в выбранном ДДВ, можно ожидать заметного изменения коэффициента пространственной корреляции между соседними строками, а за-

тем и – столбцами. Под точечным объектом-изображением БВС понимается малоразмерный объект, изображение которого вписывается в N пикселей ($N \leq 5$) массива ФИ [11].

Таким образом, выявление строки и столбца, в которых будет обнаружено заметное изменение коэффициента пространственной корреляции, может служить для определения координат БВС в пределах ФИ облачного поля.

3. Угловые размеры излучающих неоднородностей некоторых видов облачных полей ограничены значениями радиусов корреляции по строкам и столбцам (рис. 4). Поэтому допустима возможность разделения по ширине пространственных спектров излучения БВС и протяжённых излучающих неоднородностей облачного поля.

4. В пределах сегментов ФИ, имеющих угловые ограничения, равные радиусам корреляции, пространственная структура излучающих неоднородностей облачного поля по строкам и столбцам не подвержена резким изменениям (рис. 5) [12], т.е. может считаться равномерной.

Таким образом, получив статистические модели, отражающие закономерности пространственной структуры (угловые размеры неоднородностей) флуктуаций ЭЯ облачных полей атмосферы в ДДВ 1,5–2 мкм, можно переходить ко второму этапу исследования – исследованию энергетических характеристик излучения БВС.

Существует несколько методов экспериментального определения пространственного распределения ЭЯ БВС:

- Метод измерения ЭЯ БВС в полёте. Однако он очень сложен в реализации и требует наличия специального оборудования [13].

- Наземный метод измерения ЭЯ БВС. В нём проводится измерение ЭЯ БВС в заданном ДДВ с помощью радиометрической аппаратуры, перемещаемой вокруг БВС.

Для устранения основного недостатка последнего (наземного) метода БВС закрепляют в специально созданном поворачивающемся устройстве с двумя степенями свободы (рис. 6). Это позволяет находить индикатрису отражения БВС (рис. 7) не только в горизонтальной плоскости, но и при изменении его положения по углу места как в нижней, так и в верхней полусферах, с включённым или выключенным двигателем.

Рис. 5. Оценка пространственной структуры излучения облачного поля по радиусам корреляции в горизонтальном и вертикальном направлениях, где $R_{0,5}(\epsilon)$ и $R_{0,5}(\beta)$ – радиусы корреляции пространственных корреляционных функций, рассчитанные между строками (столбцами) фонового изображения; $\Delta\epsilon$ и $\Delta\beta$ – угловые дискретные сдвиги при расчёте пространственных корреляционных функций для кучевой облачности (Cu)

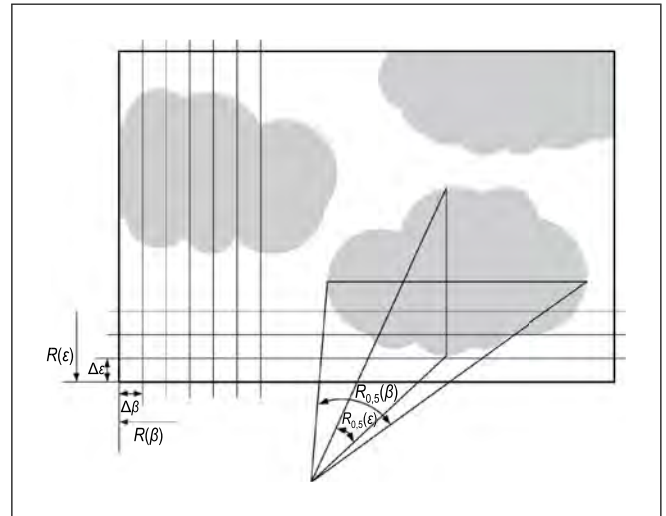


Рис. 6. Поворачивающееся устройство с двумя степенями свободы

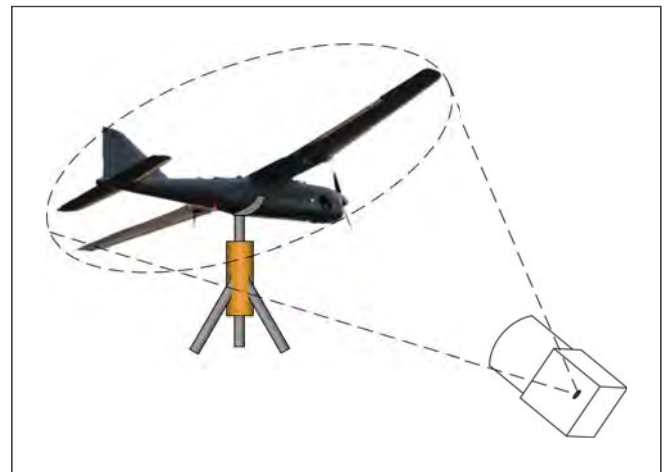
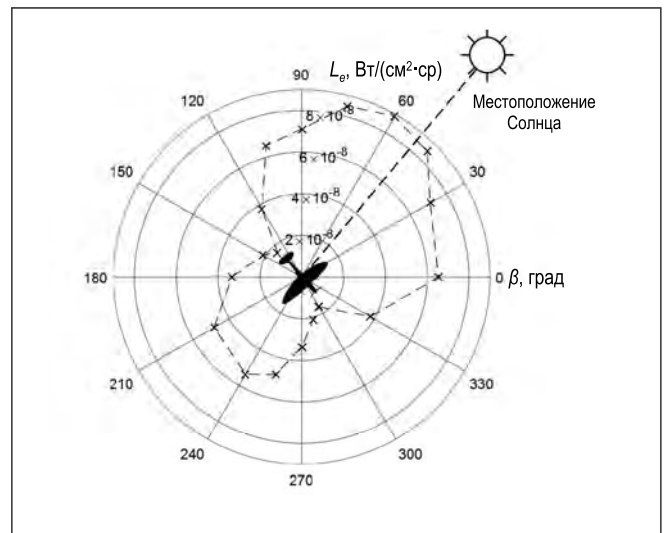


Рис. 7. Модель в виде индикатрисы отражения беспилотного воздушного судна (угол места его наблюдения – 10° , положение Солнца – 50°)



В ходе проведения экспериментального исследования нами была получена индикатриса отражения БВС при одном положении Солнца (50° по азимуту) и угле наблюдения в 10° . В дальнейшем исследования будут продолжены в интересах получения статистических моделей излучения БВС в виде индикатрис при различ-

ных положениях Солнца и углах наблюдения.

С учётом свойств статистических моделей, описывающих особенности пространственной структуры (угловые размеры неоднородностей) флуктуаций ЭЯ облачных полей в ДДВ 1,5–2 мкм, выявлено, что для некоторых типов облачности возможно обнаруже-

ние БВС прямым пороговым методом. Но для ряда типов облачности (например, Cu и Cb) этот метод малоэффективен, поскольку ЭЯ некоторых участков облачного поля может быть выше, чем у искомого точечного объекта.

Поэтому необходимо использовать другой подход к решению задачи обнаружения точечного объекта на фоне облачного поля, который заключается в том, что искомый точечный объект обнаруживают путём анализа особенностей пространственной структуры облачного поля. Данный принцип получения информации («фоновый») позволяет совершенно по-новому подойти к проблеме обнаружения и дополнить традиционный пороговый метод обнаружения в случаях, когда последний работает малоэффективно, а именно когда яркостный контраст между точечным объектом и облачным полем мал, а его изображение по размерам не превышает элемента массива ФИ [14].

При реализации фонового принципа систему обнаружения согласовывают с особенностями пространственной структуры излучения атмосферы, что значительно проще, так как фон – объект, медленно меняющийся в пространстве и времени.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алленов А.М., Соловьев В.А. Корреляционные (пространственные) связи между флуктуациями яркости, создаваемыми облачными неоднородностями в диапазоне 8–13 мкм // Труды ИЭМ. – 1995. – Вып. 25 (160): Оптика атмосферы. – С. 3–15.
2. Алленов А.М., Соловьев В.А., Якименко И.В. и др. Исследования излучения оптических фонов в диапазоне 3–5 и 8–13 мкм // Труды ИЭМ. – 1996. – Вып. 26 (161): Физика атмосферы. – С. 31–50.
3. Алленов А.М., Соловьев В.А., Якименко И.В. Структура излучения оптических фонов в диапазоне 0,4–15 мкм // Труды ИЭМ. – 1997. – Вып. 28 (163): Физика атмосферы. – С. 3–41.
4. Алленов А.М., Иванова Н.П. Временная изменчивость пространственной структуры излучения неба в диапазоне 8–13 мкм при кучевой облачности // Оптический журнал. – 2001. – Т. 68, № 3. – С. 43–44.
5. Алленов М.И., Соловьев В.А. и др. Стохастическая структура излучения облачности. – СПб.: Гидрометеоздат, 2000. – 175 с.
6. Knapp H.W. et al. Discriminating between water and ice clouds using near-infrared AVIRIS measurements // Summaries of the ninth JPL Airborne Earth Science workshop, 2000, Feb 23–25, JPL.

7. Clough S.A., Shephard M.W., Mlawer E.J., Delamere J.S., Iacono M.J., Cady-Pereira K., Boukabara S., Brown P.D. Atmospheric radiative transfer modeling: a summary of the AER codes // Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer. – 2005. – Vol. 91, Issue 2. – P. 233–244.

8. Huang B., Mielikainen J., Oh H., Huang H.L.A. Development of a GPU-based high-performance radiative transfer model for the Infrared Atmospheric Sounding Interferometer (IASI) // Journal of Computational Physics. – 2011. – Vol. 230, Issue 6. – P. 2207–2221.

9. Lieven C., Hurtmans D., Clerbaux C., Hadji-Lazaro J., Ngadi Y., Coheur P.F. Retrieval of sulphur dioxide from the infrared atmospheric sounding interferometer (IASI) // Atmospheric Measurement Techniques. – 2012. – Vol. 5, Issue 3. – P. 581–594.

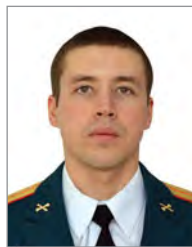
10. Chen X., Wei H., Xu Q. Infrared atmospheric transmittance calculation model // Infrared and Laser Engineering. – 2011. – Vol. 40, Issue 5.

11. Мищенко А.М., Рачковский С.С., Смолин В.А., Якименко И.В. Экспериментальные исследования пространственного распределения собственного излучения атмосферного фона в инфракрасном диапазоне волн // Радиотехника. – 2017. – № 2. – С. 119–125.

12. Криксунов Л.З. Справочник по основам инфракрасной техники. – М.: Сов. радио, 1978. – 400 с.

13. Экспериментальное определение характеристик инфракрасного излучения самолётов в полёте: [монография]: научно-теоретическое издание / В.А. Соловьев [и др.]; М-во обороны РФ. – Смоленск: ВА ВПВО ВС РФ, 2009. – 83 с.

14. Якименко И.В. Методы, модели и средства обнаружения воздушных целей на атмосферном фоне широкоугольными оптико-электронными системами. – Изд. 2-е, испр. и доп. – СПб.: Лань, 2014. – 176 с.



Мищенко Антон Михайлович, офицер российской армии. Окончил в 2009 г. ВА ВПВО ВС РФ. Адъюнкт кафедры «Специальные радиотехнические системы» ВА ВПВО

ВС РФ. Автор 5 научных работ и 1 программного продукта для ЭВМ. Область научных интересов: цифровая обработка изображений, системы наблюдения в различных диапазонах длин волн, исследование собственного излучения целей в оптическом диапазоне



Рачковский Сергей Степанович, инженер. Окончил в 1988 г. МЭИ. Инженер кафедры «Вычислительная техника» филиала «НИУ «МЭИ» в г. Смоленске.

Автор 2 научных работ. Область научных интересов: электроника и микропроцессорная техника; исследование собственного излучения атмосферы и подстилающей поверхности в оптическом диапазоне; разработка измерительной аппаратуры, общепромышленных установок



Смолин Владимир Алексеевич, инженер. Окончил в 2013 г. «НИУ «МЭИ». Ассистент кафедры «Электроника и микропроцессорная техника» филиала «НИУ

«МЭИ» в г. Смоленске. Аспирант «НИУ «МЭИ». Автор 40 научных и учебно-методических работ и 2 патентов на изобретение. Область научных интересов: цифровая обработка изображений; электроника и микропроцессорная техника; исследование собственного излучения атмосферы в оптическом диапазоне



Якименко Игорь Владимирович, доктор техн. наук, доцент. Окончил Смоленское высшее зенитное ракетное инженерное училище (1985 г.) и ВА ВПВО

ВС РФ (2006 г.). Заведующий кафедрой «Электроника и микропроцессорная техника» филиала «НИУ «МЭИ» в г. Смоленске. Автор более 200 научных и учебно-методических работ, 11 патентов на изобретение и 22 программных продуктов для ЭВМ. Область научных интересов: цифровая обработка изображений, компьютерное видение и системы технического зрения, системы наблюдения в разных спектральных диапазонах, исследование собственного излучения атмосферы, подстилающей поверхности и собственного излучения целей в оптическом диапазоне