

В. Ф. ФАТЕЕВ, В. Н. ЛАГУТКИН, Ю. В. СЛЫНЬКО

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МАЛЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ СО СПЕКТРОСКОПИЧЕСКИМИ ПРИБОРАМИ ДЛЯ МОНИТОРИНГА ГАЗООБРАЗНЫХ ВЫБРОСОВ В АТМОСФЕРЕ

Рассмотрены вопросы применения инфракрасных спектроскопических приборов на малых космических аппаратах (МКА) для мониторинга газообразных выбросов в атмосфере. Приведены оценки требуемого спектрального разрешения спектроскопических приборов. Показано, что более предпочтительно использовать на МКА интерферометры с субнанометровым спектральным разрешением, настраиваемые на наиболее интенсивные спектральные линии газовых образований. Приведены примеры спектров излучения газовых образований, пропускания атмосферы, фона; определены особенности задачи адаптивного выбора спектральных линий.

Ключевые слова: малые космические аппараты, мониторинг атмосферы, спектроскопия газов, интерферометры, фон.

В рамках исследования направлений развития и областей применения малых космических аппаратов (МКА) значительное внимание уделяется проблеме создания многоспектральных датчиков для разнообразных систем мониторинга, управления их работой и автоматической обработки полученных с их помощью данных. В работах [1, 2] эта проблема рассматривалась применительно к задачам дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) с МКА и, в частности, исследовались методы выбора количества спектральных каналов и их расстановки на оси длины волны. Благодаря тому что спектральные образы наблюдаемых при ДЗЗ объектов являются непрерывными и гладкими (в той или иной степени) функциями длины волны, оказалось возможным при решении задачи определения положения спектральных каналов на оси длины волны использовать методы ортогональных разложений функций [2]. Задача определения ширины полос спектральных каналов детально не рассматривалась, поскольку применительно к ДЗЗ значение этого параметра не является критическим.

Спектральные образы газовых образований в атмосфере как естественного, так и искусственного происхождения кардинально отличаются от образов наземных объектов, так как спектры газов являются линейчатыми и как функции длины волны представляют собой совокупность иглообразных пиков разной высоты. В настоящей работе эта особенность спектров газов используется как базовая при выработке методического подхода к определению принципов организации аппаратуры для мониторинга газообразных выбросов в атмосфере.

Как известно, взаимодействие оптического излучения с газообразной средой описывается уравнением переноса излучения [3]. Решение этого уравнения для случая отсутствия рассеяния можно представить в виде

$$B_\nu(\mathbf{r}(S), \mathbf{l}) = B_{\nu 0}(\mathbf{l})H_\nu(0, S; \mathbf{l}) + \int_0^S E_\nu^{BB}(T(\mathbf{r}(P)))dH_\nu(P, S; \mathbf{l})dP, \quad (1)$$

где $B_\nu(\mathbf{r}, \mathbf{l})$ — спектральная плотность яркости излучения как функция координат \mathbf{r} и направления наблюдения \mathbf{l} , P — длина пути вдоль направления \mathbf{l} ($dP > 0$), S — полный путь от наблюдателя до объекта, $\nu = 1/\lambda$ — частота волны излучения (в см^{-1}), λ — длина волны, $E_\nu^{BB}(T(\mathbf{r}))$ — спектральная плотность излучения абсолютно черного тела с температурой T , определяемая формулой Планка, $H_\nu(P, S; \mathbf{l})$ — спектральная функция пропускания газообразной среды на пути от точки $\mathbf{r}(P)$ до точки $\mathbf{r}(S)$ (положение наблюдателя) вдоль направления наблюдения, определяемая соотношением

$$H_\nu(P, S; \mathbf{l}) = \exp \left[- \int_P^S \beta_\nu(\mathbf{r}(\mathbf{S}'))dS' \right], \quad (2)$$

$\beta_\nu(\mathbf{r})$ — спектральный показатель поглощения.

Заметим, что функция $H_\nu(P, S; \mathbf{l})$ является неубывающей функцией P , причем $0 \leq H_\nu(P, S; \mathbf{l}) \leq 1$.

Функция $B_{\nu 0}(\mathbf{l})$ определяет спектральную плотность потока излучения внешнего источника, находящегося на линии наблюдения за газообразным объектом, т.е. фона подстилающей поверхности, облаков или звезд.

Выражение для спектрального показателя поглощения излучения в многокомпонентном газе имеет вид

$$\beta_\nu(\mathbf{r}) = \sum_k \rho_k(\mathbf{r})\beta'_{\nu k}(T(\mathbf{r}), P(\mathbf{r})), \quad (3)$$

где $\rho_k(\mathbf{r})$ — плотность k -й компоненты газа, $\beta'_{\nu k}(T, P)$ — коэффициент поглощения k -й компоненты для излучения с частотой ν , который представляет собой суперпозицию вкладов отдельных спектральных линий

$$\beta'_{\nu k}(T, P) = \sum_i I_{ki} F_k(\nu - \nu_{ki}, \gamma_{ki}), \quad (4)$$

I_{ki} — интенсивность излучения i -й линии, $F_k(\nu - \nu_{ki}, \gamma_{ki})$ — контур линий, ν_{ki} — несущая частота, γ_{ki} — полуширина контура. Наиболее часто используемой аппроксимацией контура спектральных линий является лоренцевский контур (подробнее см. [4])

$$F_k(\nu - \nu_{ki}, \gamma_{ki}) = \frac{1}{\pi} \frac{\gamma_{ki}}{(\nu - \nu_{ki})^2 + \gamma_{ki}^2}. \quad (5)$$

Интенсивность и полуширина линий зависят от температуры и давления. Для атмосферных газов типичная полуширина линий в нижней атмосфере составляет $\gamma \sim 10^{-1} \text{ см}^{-1}$ ($\Delta\lambda \sim 10^{-1} \text{ нм}$ для средневолнового ИК-диапазона), в верхней — $\gamma \sim 10^{-2} - 10^{-3} \text{ см}^{-1}$ ($\Delta\lambda \sim 10^{-2} - 10^{-3} \text{ нм}$).

Соотношения (1)—(5) представляют собой количественную модель сигналов и помех для различных условий мониторинга газообразных объектов в атмосфере с МКА. Основную роль в этой модели играет спектральная функция пропускания газообразной среды (2), которая, согласно выражениям (3)—(5), зависит от пространственного распределения состава, температуры и давления газообразных объектов. В случае неразрезанных газовых образований эта функция, в основном принимая значения около единицы, имеет очень узкие, порядка ширины контуров спектральных линий, и глубокие, вплоть до нуля, „провалы“. В соответствии с уравнением (1) это означает, что принимаемое излучение от газовых образований сконцентрировано только в узких полосах (линиях), вне которых принимается излучение внешних источников, являющееся в этом случае фоном наблюдения.

В случае разреженных газовых образований спектральная функция пропускания может не иметь глубоких „провалов“ даже в линиях с большой интенсивностью поглощения газов, при этом их собственное тепловое излучение может быть мало по сравнению с излучением фона. Тем не менее, если пространственное распределение фона относительно плавно изменяется или в случае, когда оно заранее известно, газовые образования можно наблюдать „на просвет“, выделяя области потемнения на изображениях фона, полученных в линиях поглощения газов.

Наблюдение и распознавание газообразных выбросов в атмосфере можно осуществлять на базе МКА, оснащенных спектроскопическими приборами. Каждый МКА в зависимости от высоты орбиты может осуществлять мониторинг газообразных выбросов в атмосфере в полосе шириной ~6000 км вдоль орбиты. Использование развитой орбитальной группировки МКА позволит обеспечить, во-первых, оперативный контроль атмосферы на всех широтах и, во-вторых — возможность триангуляционных измерений, на основе которых можно определить пространственное положение выбросов и оценить их пространственную конфигурацию.

В качестве возможных спектроскопических приборов для МКА следует рассматривать фурье-спектрометры и перестраиваемые интерферометры [5]. Оба типа имеют высокое спектральное разрешение, до $\sim 10^{-2}$ см⁻¹ и меньше [6]. Сравнительный анализ этих приборов показал, что применение на МКА перестраиваемых интерферометров более предпочтительно. Во-первых, перестраиваемым интерферометром можно управлять, поочередно настраивая его на наиболее интенсивные спектральные (известные) линии газовых образований. Это обеспечивает большее быстродействие, что очень важно для реализации оперативного кругового обзора пространства с низкоорбитальных МКА. Во-вторых, интерферометры, настраиваемые на интенсивные спектральные линии газовых образований, имеют более высокую чувствительность, так как влияние фона в узких линиях сводится к минимуму. В-третьих, интерферометры могут работать в более широком поле зрения и объединяться с многоэлементными фотоприемниками.

При адаптивном определении набора спектральных линий, за которыми должен следить спектральный прибор, необходимо учитывать следующую информацию: возможный состав наблюдаемых газообразных объектов, спектральную функцию пропускания атмосферы, спектральную функцию яркости фона. На основе известных составов газовых образований можно заранее сформировать каталог интенсивных спектральных линий.

На рис. 1 проиллюстрированы расчетные фрагменты спектра излучения продуктов сгорания углеводородного топлива в верхней атмосфере в двух спектральных интервалах средневолновой части ИК-диапазона. Расчет выполнен на модели, описанной в работе [7].

На рис. 1, *а* хорошо видны отдельные линии и яркий дуплет линий паров воды на частоте $\nu \approx 2994,5$ см⁻¹, ширина линий $\sim 0,1$ см⁻¹. Фрагмент спектра, показанный на рис. 1, *б*, интересен тем, что на нем в интервалах частот 3688—3689 и 3691—3692 см⁻¹ наблюдаются группы плотно расположенных интенсивных линий с общей шириной $\sim 0,5$ см⁻¹. Из рис. 1 видно, что для выделения излучения в спектральных линиях спектроскопические приборы должны обеспечивать разрешение $\sim (1—5) \cdot 10^{-1}$ см⁻¹, т.е. на уровне десятых долей нанометра для средневолнового ИК-диапазона.

На рис. 2 приведен график спектральной функции пропускания атмосферы, рассчитанной на модели [8] в предположении, что газовое образование находится на высоте 10 км и зенитный угол наблюдения равен 45°.

„Провалы“ функции пропускания обусловлены линиями поглощения излучения молекулярными атмосферными составляющими, главным образом, водяным паром и углекислым газом, расположенными на пути от объекта до МКА.

На рис. 3 приведены графики расчетной спектральной плотности яркости фона облаков с высотой верхней границы 5 км в полосе частот 3680—3710 см⁻¹ (в дБ к Вт/(м²·мкм·ср)). Расчет проведен на модели [9] с модернизированным модулем пропускания атмосферы [8].

Спектр фона облаков имеет „обратную“ линейчатую структуру, в которой узкие и глубокие провалы (на 15—20 дБ) обусловлены линиями поглощения атмосферных газов.

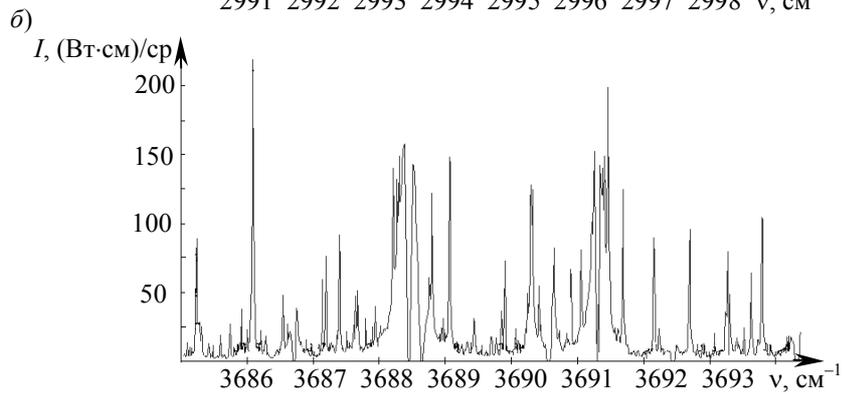
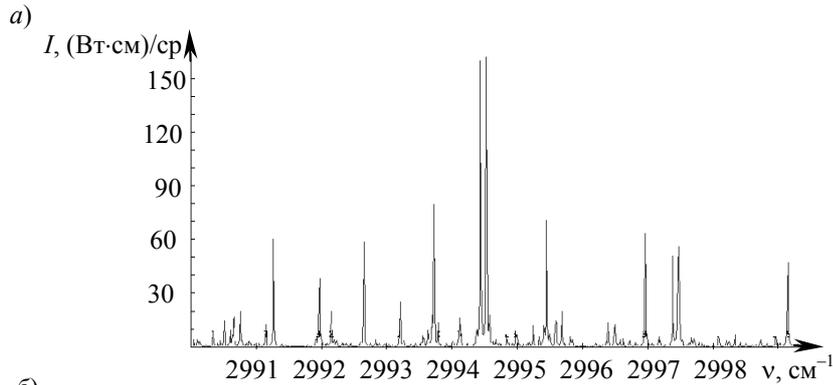


Рис. 1

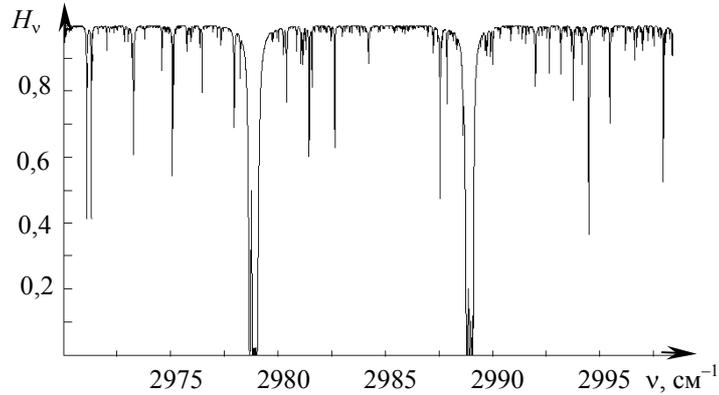


Рис. 2

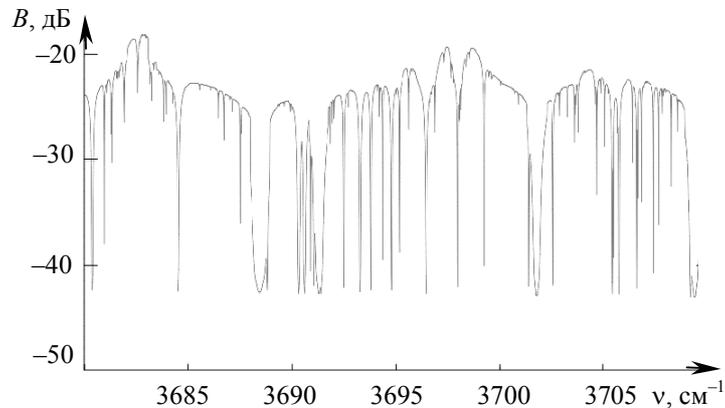


Рис. 3

Спектры пропускания атмосферы и яркости фона зависят от состояния атмосферы, параметров ее влажности и облачности. Совместный анализ спектральных функций излучения газовых образований, фона и пропускания атмосферы, подобных представленным на рис. 1—3,

приводит к заключению, что задача оптимального выбора по критерию максимума отношения сигнал—помеха спектральных линий для настройки интерферометра должна решаться адаптивно с учетом реального состояния атмосферы в текущей зоне контроля МКА. При этом наибольшие значения отношения сигнал—помеха будут иметь место для тех линий газовых образований, которые располагаются в областях минимума спектра фона.

Таким образом, проведенные исследования показали, что применение спектроскопических приборов с субнанометровым разрешением для мониторинга газообразных выбросов в атмосфере является перспективным направлением работ по созданию МКА.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Фатеев В. Ф., Миньков С. А.* Новое направление развития МКА дистанционного зондирования Земли // Изв. вузов. Приборостроение. 2004. Т. 47, № 3. С. 18—22.
2. *Мальцев Г. Н., Козинев И. А., Фатеев В. Ф.* Методы выбора наиболее информативных спектральных каналов при дистанционном зондировании Земли с малых космических аппаратов // Изв. вузов. Приборостроение. 2007. Т. 50, № 6. С. 23—31.
3. *Чандрасекар С.* Перенос лучистой энергии. М.: ИЛ, 1953. 431 с.
4. *Зуев В. Е.* Распространение видимых и инфракрасных волн в атмосфере. М.: Сов. радио, 1970. 496 с.
5. *Курбатов Л. Н.* Оптоэлектроника видимого и инфракрасного диапазонов спектра. М.: Изд-во МФТИ, 1999. 320 с.
6. Справочник по инфракрасной технике / Под ред. *У. Вольфа и Г. Цисуса*. Т. 4. М.: Мир, 1999. 472 с.
7. *Лагуткин В. Н., Слынько Ю. В.* Метод расчета спектральных яркостей потока смеси газа и частиц // Тр. XLX науч. конф. МФТИ „Современные проблемы фундаментальных и прикладных наук“. Ч. 1. М.: МФТИ, 2007. С. 119—121.
8. *Слынько Ю. В.* Модель расчета переноса излучения на основе открытой базы данных HITRAN // Вопросы радиоэлектроники. Сер. РТЛ. 2007. Вып. 4. С. 5—11.
9. *Лагуткин В. Н., Лукьянов А. П., Подкорытов Е. Н., Репин В. Г.* Трехмерная динамическая модель полей яркости фона, использующая расчетные индикатрисы многократного рассеяния излучения в облаках и изображения, полученные метеорологическими спутниками // Вопросы радиоэлектроники. Сер. РТЛ. 2004. Вып. 1. С. 101—117.

Сведения об авторах

- Вячеслав Филиппович Фатеев** — д-р техн. наук, профессор; президент ОАО МАК „Вымпел“, кафедра информационных систем, Москва; E-mail: vimpel@vimpel.ru
- Владимир Николаевич Лагуткин** — канд. техн. наук, доцент; ОАО МАК „Вымпел“, кафедра информационных систем, Москва; E-mail: vlagutkin@mail.ru
- Юрий Вячеславович Слынько** — инженер; ОАО МАК „Вымпел“, кафедра информационных систем, Москва; E-mail: urassl@gmail.com

Рекомендована Ученым советом
ВКА им. А. Ф. Можайского

Поступила в редакцию
20.10.08 г.