

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

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МАЛЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ СО СПЕКТРОСКОПИЧЕСКИМИ ПРИБОРАМИ ДЛЯ НАБЛЮДЕНИЯ 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

$$B_v(\mathbf{r}(S), \mathbf{l}) = B_{v0}(\mathbf{l})H_v(0, S; \mathbf{l}) + \int_0^S E_v^{BB}(T(\mathbf{r}(P)))dH_v(P, S; \mathbf{l})dP, \quad (1)$$

где $B_v(\mathbf{r}, \mathbf{l})$ — 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, $E_v^{BB}(T(\mathbf{r}))$ — спектральная плотность излучения абсолютно черного тела с температурой T , определяемая формулой Планка, $H_v(P, S; \mathbf{l})$ — спектральная функция пропускания газообразной среды на пути от точки $\mathbf{r}(P)$ до точки $\mathbf{r}(S)$ (положение наблюдателя) вдоль направления наблюдения, определяемая соотношением

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

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

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

Функция $B_{v0}(\mathbf{l})$ отражает 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

$$\beta_v(\mathbf{r}) = \sum_k \rho_k(\mathbf{r})\beta'_{vk}(T(\mathbf{r}), P(\mathbf{r})), \quad (3)$$

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

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

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 — $\gamma \sim 10^{-2} \text{—} 10^{-3} \text{ см}^{-1}$ ($\Delta\lambda \sim 10^{-2} \text{—} 10^{-3} \text{ нм}$).

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, в этом случае является 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 (и известные) линии газовых образований. Это обеспечивает большее быстроедействие, 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 средневолевой 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 средневолевого 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/(м 2 /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.

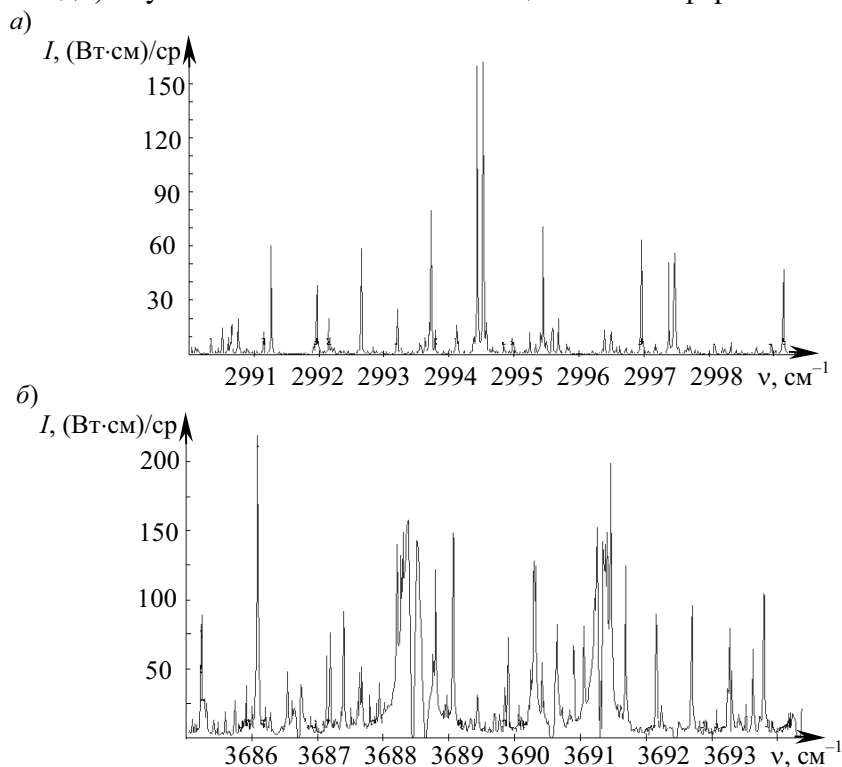


Рис. 1

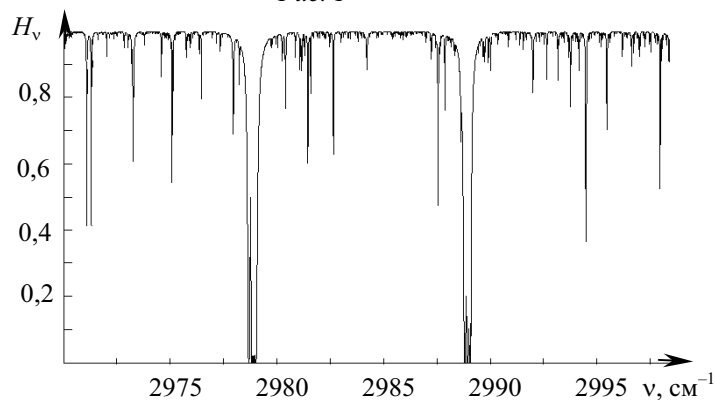


Рис. 2

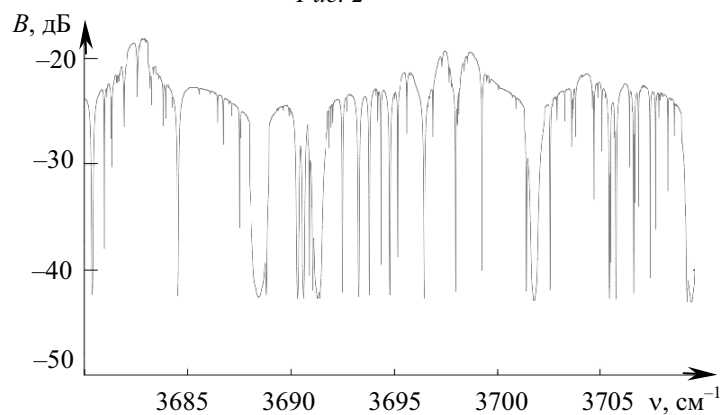


Рис. 3

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 наблюдения 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. Цисиса 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 |
| 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.