

Технология синтезированных каналов для зондирования атмосферы с помощью Фурье-спектрометра

А.К. Городецкий

*Институт космических исследований РАН
117997 Москва, ул. Профсоюзная, 84/32
E-mail: gora@iki.rssi.ru*

Рассматривается метод повышения точности восстановления профиля температуры в атмосфере на основе анализа информативности данных измерений ИК-излучения с высоким спектральным разрешением с применением Фурье-спектрометрии. Улучшение точности решения обратной задачи со среднеквадратической ошибкой 1К достигается применением технологии синтезированных спектральных каналов.

1. Метод информационных синтезированных каналов

Метод информационных синтезированных каналов разрабатывается для решения задач восстановления высотного распределения профилей температуры и влажности в атмосфере и определения содержания радиационно-активных газовых компонент применительно к данным измерений Фурье-спектрометра (ФС) и рассматривается как один из этапов планирования эксперимента.

1.1. Назначение метода

Метод предназначен для увеличения точности восстановления атмосферных параметров за счет увеличения числа спектральных линий в спектре излучения атмосферы, используемых при решении соответствующей обратной задачи. Увеличение числа используемых спектральных частот уменьшает эквивалентный шум канала и повышает отношение сигнала к шуму. Задача решается путем создания информационных синтезированных каналов, каждый из которых содержит несколько спектральных линий с близкими весовыми функциями. В связи с тем, что для различных синтезированных каналов число таких линий будет различным, измерительная ошибка каналов будет различной. Если дисперсии ошибок измерений для спектральных компонент канала различны, то интенсивность излучения для синтезированного канала может быть представлена как наиболее вероятное взвешенное значение I' и будет иметь вид

$$I' = \sum_i (W_i I'_{vi}) / \sum_i W_i \quad (1)$$

В выражении (1) веса W_i обратно пропорциональны квадратам ошибок измерений для отдельных спектральных компонент. Для некоррелированных ошибок при нормальном законе распределения дисперсия σ'^2 взвешенного значения I' имеет вид

$$\sigma'^2 = \sum_i W_i^2 \sigma_{vi}^2 \quad (2)$$

В случае коррелированных ошибок измерений дисперсия σ'^2 выражается через корреляционную матрицу ошибок отдельных компонент. Дисперсии σ'^2 ошибок измерений являются диагональными элементами ковариационной матрицы \mathbf{E} ошибок измерений в различных спектральных каналах.

Диагональные элементы ковариационной матрицы решений для восстанавливаемого атмосферного параметра с применением метода статистической регуляризации будут иметь вид

$$\mathbf{D} = (\mathbf{A}^T \mathbf{E}^{-1} \mathbf{A} + \mathbf{S}^{-1})^{-1} \quad (3)$$

Здесь \mathbf{A} - матрица системы уравнений для восстанавливаемого параметра, \mathbf{A}^T - транспонированная матрица, \mathbf{S} - корреляционная матрица вариаций атмосферного параметра, \mathbf{S}^{-1} - обратная матрица. Из выражений (1) - (3) следует, что уменьшение диагональных элементов матрицы \mathbf{D} , характеризующих дисперсию ошибки восстановления атмосферного параметра, достигается путем увеличения числа спектральных компонент в канале. Вместе с тем увеличение количества частот в канале не должно ухудшать информационное содержание решения для восстанавливаемого параметра.

1.2. Выбор спектральных частот синтезированных каналов.

Выбор спектральных частот синтезированных каналов в каждом канале определяет матрицы \mathbf{A} , \mathbf{A}^T . Метод формирования синтезированных каналов и выбора спектральных компонент рассматривается ниже для задачи восстановления профиля температуры в атмосфере.

Нахождение искоемых параметров осуществляется решением системы уравнений, представляемой в операторной записи в виде

$$\mathbf{A} t = f \quad (4)$$

Здесь t - атмосферные параметры, f - измеренная интенсивность излучения, \mathbf{A} – оператор задачи. Интенсивность уходящего излучения I_v зависит от высотных профилей температуры $T(\zeta)$, функции пропускания атмосферы $P_v(u)$ и температуры поверхности T_s (излучательная способность поверхности $\delta = 1$)

$$I_v = B_v [T_s] P_{v,S} - \int_0^1 B_v [T(u)] \partial P_v(u) / \partial \log u d \log u, \quad (5)$$

Здесь $B_v [T(u)]$ - функция Планка для температуры на уровне атмосферы с относительным давлением u , $= p/p_0$, p_0 - давление на уровне земной поверхности. Уравнение (5) линеаризуется относительно вариаций температуры $t(u)$

$$f_v^* = I_v - I_v^0 \quad (6)$$

$$t(u) = T(u) - T(u)^0 \quad (7)$$

Ошибки измерений d рассматриваются как случайный вектор с нулевым средним значением и среднеквадратичным отклонением σ .

$$f_v = f_v^* + d \quad (8)$$

$$f_v = \partial B_v [T_s^0] / \partial T P_{v,S} t_s - \int_0^1 \partial B_v [T(u)^0] / \partial T \partial P_v(u) / \partial \log u d \log u \quad (9)$$

В матричной форме система уравнений (9) имеет вид (4).

Статистическое решение задачи использует корреляционную матрицу температуры в атмосфере \mathbf{S} и корреляционную матрицу измерительных ошибок \mathbf{D} [3]

$$t = (\mathbf{A}^T \mathbf{D}^{-1} \mathbf{A} + \mathbf{S}^{-1})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{D}^{-1} f \quad (10)$$

Ошибки восстановления профиля температуры в атмосфере определяются как квадратный корень из диагональных элементов матрицы \mathbf{G}

$$\mathbf{G} = (\mathbf{A}^T \mathbf{D}^{-1} \mathbf{A} + \mathbf{S}^{-1})^{-1} \quad (11)$$

2. Информационное содержание измерений

Ниже приводятся результаты исследований для задачи температурного зондирования. Оптимизация решения задачи проводится на основе информационной метрики с формированием ряда синтезированных информационных каналов, каждый из которых включает несколько узких областей спектра. Процедура оптимизации с формированием синтезированных каналов включает:

-последовательный выбор наиболее информативных участков спектра в указанных диапазонах спектра в полосах поглощения и окнах прозрачности атмосферы;

-определение размерности матрицы линейных интегральных уравнений, используемых для решения обратной задачи с учетом априорной информации, структуры ошибок измерений и доступной дополнительной информации;

-формирование синтезированных информационных каналов, каждый из которых включает несколько узких областей спектра с наиболее близкими весовыми функциями, отбираемыми с учетом положения их максимумов и полуширин.

Для определения длин волн с максимумом информации о профиле температуры в атмосфере использовано количество информации по Шеннону $J(t, f)$ [1]

$$J(t, f) = 0.5 \log_2 [| \mathbf{A} \mathbf{S} \mathbf{A}^T + \mathbf{D} | | \mathbf{D}^{-1} |] \quad (12)$$

В случае равноточных измерений имеем

$$J(t,f) = 0.5 \log_2 [| \mathbf{A S A}^T + \sigma^2 \mathbf{E} | / (\sigma^2)^m] \quad (13)$$

3. Результаты численного моделирования для уходящего излучения.

Для решения перечисленных задач с использованием данных измерений Фурье-спектрометра ИКФС-2 [2] проведено вычисление функции пропускания для моделей атмосферы и весовых функций полинейным методом с учетом спектрального разрешения спектрометра $0,5 \text{ см}^{-1}$ [3]. Проведенное численное моделирование позволило сформировать систему из 10 синтезированных информационных каналов, характеристики которой приведены в табл. 1.

Таблица 1. Характеристики системы из 10 синтезированных информационных каналов

N	Волновое число см^{-1}	Пик весовой функции (мбар)	Синтезированные каналы см^{-1}		
			Число интервалов	Мин волновое число	Макс волновое число
1	724, 5	1013	10	724, 5	728
2	668	1	2	667,5	668
3	729, 25	628	4	716,25	729,25
4	691, 25	130	5	891,25	728,25
5	666, 25	59,5	5	666,25	670,75
6	668, 75	9,3	6	662,5	669,25
7	702, 25	281	6	673,5	702,25
8	667	27,7	6	666,75	679
9	675, 25	95	10	672	685
10	723 ,25	800	4	714,25	723,5

Точность восстановления профиля температуры в атмосфере определялась для нескольких типичных уровней экспериментальных ошибок в пределах – 0,1 - 1% (табл. 2). Из данных табл. 2 следует, что разработанная методика позволяет уменьшить среднюю ошибку восстановления профиля температуры в слое атмосферы 10-1013 мб до 1К при ошибке измерений интенсивности уходящего излучения 0,2%.

Таблица 2. Ошибки восстановления температуры атмосферы /град К/

Уровни давления /мб/	Ошибки восстановления температуры атмосферы / К/					
	Ошибка измерений 0,1%		Ошибка измерений 0,2%		Ошибка измерений 1%	
	Средняя	Максим.	Средняя	Максим.	Средняя	Максим.
1013 - 500	1	1,5	1,1	1,7	1,2	2,2
500 - 100	1	1,6	1,1	1,7	1,2	2,0
100 - 10	0,8	1,2	0,85	1,4	0,9	1,5
1013-10 среднее	0,95		1,0		1,15	

4. Применение метода информационных синтезированных каналов для нисходящего излучения.

Из проведенных в разделе 1 соотношений (2), (3) и выражения для количества информации (12, 13) следует, что при применении метода синтезированных каналов в состав набора спектральных компонент должны включаться частоты с максимально близкими высотными профилями производной функции пропускания по высоте. Необходимо отметить, что возможности такого выбора будут возрастать с увеличением спектрального разрешения и увеличения числа компонент в спектре. Для спектрального разрешения $0,5 \text{ см}^{-1}$ выбор спектральных компонент может быть начат с определения тех спектральных компонент, которые имеют максимальные по величине и близкие по значению производные функции пропускания излучения по высоте. В качестве примера рассмотрим возможности формирования каналов по данным расчетов нисходящего излучения в спектральном диапазоне $739\text{-}759 \text{ см}^{-1}$ для модели атмосферы средние широты, лето. В табл. 3 и на рис. 1 приводятся значения высотного распределения производной $\partial P/\partial h$ для 2 волновых чисел $739,75$ и $743,5 \text{ см}^{-1}$.

Таблица 3. Характеристика $\partial P/\partial h$ (км^{-1}) спектральных компонент синтезированного канала для частот $739,5$ и $743,5 \text{ см}^{-1}$

Высота, км	Значение производной $\partial P/\partial h$ (км^{-1})	
	$739,75 \text{ см}^{-1}$	$743,5 \text{ см}^{-1}$
0	0,2478E+00	0,2509E+00
1	0,1053E+00	0,1032E+00
2	0,2907E-01	0,2826E-01
3	0,1121E-01	0,1079E-01
4	0,5172E-02	0,4902E-02
5	0,2872E-02	0,2696E-02
6	0,1730E-02	0,1613E-02
7	0,1103E-02	0,1028E-02
8	0,7144E-03	0,6647E-03
9	0,4569E-03	0,4265E-03
10	0,2989E-03	0,2789E-03

Из приведенных данных видно, что две спектральные компоненты имеют достаточно близкие характеристики: в диапазоне высот 0-1 км скорость убывания производной отличается для этих частот на 3%, а разность значений радиационной температуры излучения атмосферы – на $0,72\text{К}$ при среднем значении $284,35\text{К}$. Вместе с тем отметим, что при ошибке измерений в каждом канале $0,5\text{К}$ ошибка измерения средневзвешенной радиационной температуры для этих двух спектральных компонент будет составлять $0,36\text{К}$. Данные рис. 2 выявляют характерное отличие характеристик ядра матрицы A для восходящего и нисходящего излучения. Для восходящего излучения весовые функции $\partial P/\partial h$ (или $\partial P/\partial \log(p/p_0)$) имеют выраженный максимум и полуширину, а для нисходящего излучения – весовые функции для задач восстановления профиля температуры и влажности монотонно убывают с достаточно высокой скоростью, что ограничивает информативность решения задачи для больших высот.

На основании проведенного рассмотрения для участка спектра $739\text{-}759 \text{ см}^{-1}$ можно сформировать 3 информационных канала, применяемых при решении задачи определения высотного профиля температуры для нисходящего излучения атмосферы.



Рис. 1. Зависимость производной $\partial P/\partial h$ для участков спектра $739,75 \text{ см}^{-1}$ $743,5 \text{ см}^{-1}$

Таблица 4. Характеристики информационных каналов h для участков спектра $739,75 \text{ см}^{-1}$ $743,5 \text{ см}^{-1}$

№ канала	Диапазон высот/км/	Частоты см^{-1}	Значение $\partial P/\partial h$ на высоте $H1$	Отношение $\frac{(\partial P/\partial h)_{H1}}{(\partial P/\partial h)_{H2}}$
1	0,1 -1км	740,5	0,8928	12,2
		740,75	0,9066	11,9
2	1-2 км	739,75	0,1862	1,33
		743,5	0,1855	1,34
3	2-5 км	749,5	0,1486	1,22
		757,5	0,1450	1,20

Приведенные в табл. 3, 4 данные рассматриваются как пример применения метода информационных синтезированных каналов для нисходящего излучения.

Результаты настоящей работы направлены на разработку технологий, методики и программного обеспечения для задач дистанционного зондирования применительно к программе работ по проекту "Технология дистанционного зондирования полей температуры, влажности и концентраций основных малых газовых составляющих в атмосфере с использованием инфракрасного Фурье-спектрометра повышенной информативности" в рамках ФЦНТП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития науки и техники» на 2002-2006 годы».

Литература

1. Покровский О. М. Об оптимальных условиях косвенного зондирования атмосферы.
2. Изв. АН СССР, сер Физика атмосферы и океана, 1969, т.5, №9, стр. 1324-1327.
3. Uspensky A.B., Cherny I.V., Chernyavsky G.M., Golovin Yu. M., Zavelevitch F.S., Gorodetsky A.K., Moshkin B.E., Gorbunov G.G., Romanovsky A.S., 1999: Sounding instruments for future Russian meteorological satellites. Technical proceedings of the tenth international ATOVS study conference. Boulder, Colorado, 27 January-2 February 1999, 533-543.
4. Gorodetsky A.K., Ignatiev N.I., Moshkin B.E., Golovin Yu. M., Zavelevitch F.S., Matsisky Yu.P. The optimization of the high resolution satelliteborne fourier spectrometers for meteorological tasks. Current problems in atmospheric radiation. St.- Petersburg, 2000, p.176-177.