

ИССЛЕДОВАНИЕ ТОЧНОСТИ ЭКСТРАПОЛЯЦИИ ВЕРТИКАЛЬНЫХ ПРОФИЛЕЙ ТЕМПЕРАТУРЫ И ОРТОГОНАЛЬНЫХ СОСТАВЛЯЮЩИХ СКОРОСТИ ВЕТРА С ПОМОЩЬЮ ДВУМЕРНОЙ ДИНАМИКО-СТОХАСТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

Горев Е. В.

Институт оптики атмосферы СО РАН, г. Томск, Россия (634021, Томск, пл. Академика Зюева, 1), e-mail: gfm@iao.ru

Обсуждаются результаты экспериментальных исследований точности экстраполяции вертикальных профилей температуры и ортогональных составляющих скорости ветра в пограничном слое атмосферы (до высоты 1600 м), полученных с помощью динамико-стохастического метода, основанного на использовании алгоритма калмановской фильтрации и двумерной динамико-стохастической модели. В качестве экспериментальных данных были взяты многолетние (2007–2010 гг.) двух срочные (0 и 12 ч. по Гринвичу) радиозондовые измерения со станций, находящихся в различных физико-географических условиях. При этом измеренные значения предварительно были экстраполированы на заданные высоты. Для расчетов были использованы среднеслойные значения метеопараметров. При проверке точности алгоритма высотной экстраполяции в пограничном слое атмосферы использованы среднеквадратическая погрешность и вероятность ошибок экстраполяции метеорологических параметров более и менее заданной величины.

Ключевые слова: динамико-стохастическая модель, фильтр Калмана, экстраполяция.

INVESTIGATION OF THE EXTRAPOLATION ACCURACY OF VERTICAL PROFILES AIR TEMPERATURE AND ORTHOGONAL COMPONENTS OF THE WIND SPEED WITH 2-D DYNAMIC-STOCHASTIC MODEL

Gorev E. V.

Institute of Atmospheric Optics SB RAS, Tomsk, Russia (634021, Tomsk, sq. Academician Zuev, 1), e-mail: gfm@iao.ru

The results of experimental investigation of the accuracy of extrapolation vertical profiles air temperature and orthogonal components of wind speed in boundary atmospheric layer (under 1600 m) obtained with using dynamic-stochastic method based on the 2-D dynamic-stochastic model and Kalman filter algorithm, are discussed. As experimental data was taken long-term (2007-2010) two-times (0 and 12 GMT) radiosondes measurements from stations with different physiographic conditions. Measured values were extrapolated to the specified heights. For calculations was used average in the layer values of meteorological parameters. For verification accuracy of the heights extrapolation algorithm in boundary atmospheric layer used mean-square error and probability errors of extrapolation more and less fixed value.

Key words: dynamic-stochastic model, Kalman filter, extrapolation.

Введение

Среди широкого спектра проблем современной метеорологии важное место занимает проблема восполнения информации о состоянии атмосферы на отдельных высотных уровнях в текущий момент времени, по имеющимся данным на ниже и вышележащих уровнях, а также данным, полученным в предыдущие моменты времени, т.е. процедура экстраполяции метеорологических параметров.

Область применения данной процедуры весьма широка. В частности, можно выделить задачу, связанную с лидарным дистанционным зондированием состояния атмосферы. Несмотря на преимущества лидарных систем, перед радиозондированием, есть и существенные недостатки, среди которых их зависимость от погодных условий. Так,

например, при низкой сплошной облачности, тумане и интенсивных осадках оптическое зондирование атмосферы вообще не проводится. Поэтому в подобных погодных условиях (для обеспечения всепогодности лидарного зондирования) необходимо использовать один из возможных алгоритмов численной экстраполяции метеорологических полей по высоте, осуществляемой по данным наземного или нижележащих уровней.

На практике, в метеорологии, данная задача длительное время решалась на основе методов статистической экстраполяции, базирующихся на использовании уравнений множественной регрессии [2, 6, 7]. Однако эти методы дают удовлетворительные результаты лишь для атмосферных слоев небольшой толщины и при отсутствии существенных изломов в вертикальных профилях метеорологических величин [4].

Цель исследования

Целью настоящей статьи является рассмотрение результатов численной оценки точности экстраполяции, проведенной при помощи динамико-стохастического подхода, предложенного авторами данной статьи в [3], основанного на применении двумерной динамико-стохастической модели и алгоритма фильтра Калмана.

Материал и метод исследования

Данный подход заключается в следующем. Предположим, что интересующие нас метеорологические величины непрерывно распределены в некотором пространстве. При этом объем ограничен снизу уровнем земли (рис. 1), сверху – высотой рассматриваемого слоя атмосферы H , а геометрические размеры в нижнем сечении определяются размерами, в пределах которого корреляционная функция интересующей нас метеовеличины существенным образом не изменяется.

В пределах подобного пространства произвольно размещена станция высотного зондирования, обеспечивающая измерения метеорологических величин во всем взятом атмосферном слое с разрешением по высоте Δh . Эти измерения можно представить для некоторого фиксированного момента времени t_k в виде N -мерного профиля (вектора), каждая компонента которого соответствует определенному высотному уровню $h_i = h_1, h_2, \dots, H$.

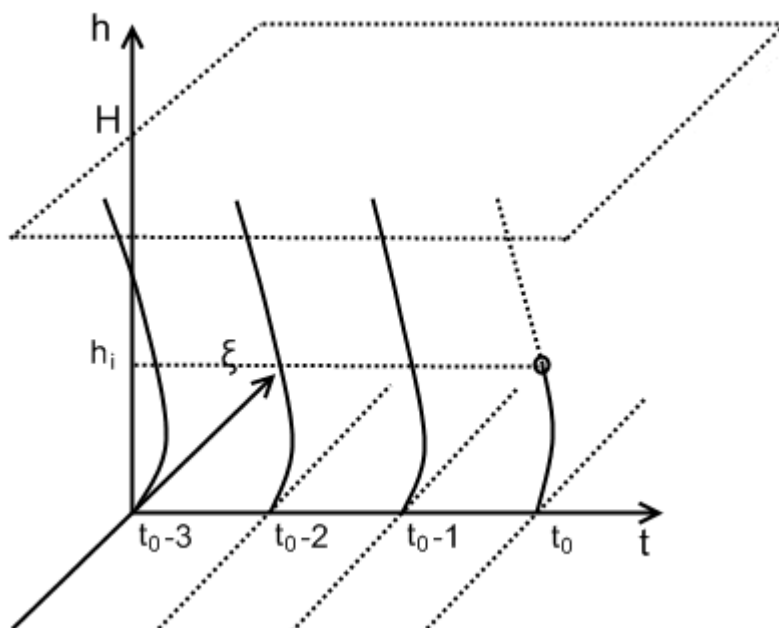


Рис. 1. Измерения метеопараметра во времени

Задача экстраполяции любой из метеорологических величин в заданной точке пространства (x_0, y_0, h_i) по данным единичной станции высотного наблюдения заключается в оценке его значения в фиксированный момент времени t_0 по данным измерений на выше- или нижележащих уровнях и измерениям в предыдущие моменты времени с помощью некоторой математической модели [2, 6].

В качестве математической модели, используемой для решения поставленной задачи, была предложена малопараметрическая динамико-стохастическая модель [3], которая описывает зависимость изменения поля ξ по высоте и во времени и имеет вид:

$$\xi_h(k) = \sum_{m=h}^{h+i} \sum_{j=0}^K d_{j,m} \cdot \xi_m(k-j) + \varepsilon_h(k) \quad (1)$$

где $\xi_h(k)$ – значение поля метеовеличины на фиксированной высоте h в момент времени k ; m – текущий номер высотного уровня, на котором выполняется экстраполяция, причем m меняется от h до $h+i$ (здесь $i=1, 2, \dots, n$ – максимальное число высотных уровней, данные которых учитываются при экстраполяции поля ξ на уровне h); j – текущее значение дискретного времени, изменяющегося от 0 до K ; $d_{j,m}$ – неизвестные коэффициенты, подлежащие оцениванию и определяющие взаимную связь между значением поля $\xi_h(k)$ и его значениями в предыдущие моменты времени на заданной высоте и вышележащих высотных уровнях, т.е. $\xi_m(k-j)$; $\varepsilon_h(k)$ – невязка модели, которая определяется стохастичностью рассматриваемых атмосферных процессов.

Подобный подход позволяет уже на основе двух предшествующих высотных наблюдений и наземных данных, полученных в срок восстановления, восполнить

недостающую информацию на всех заданных уровнях ПСА, причем не только в месте расположения аэрологической станции (или системы лидарного зондирования), но и во всех произвольных точках мезомасштабной области, где проводятся наземные метеорологические измерения [5].

В качестве исходных данных был взят массив двухсрочных (00 и 12 ч. по Гринвичу) радиозондовых наблюдений за январь и июль 2007–2010 гг., полученный для двух аэрологических станций: Москва (55°45'с.ш., 37°57'в.д) и Новосибирск (54°58'с.ш., 82°57'в.д), находящихся в районах с различными физико-географическими условиями. Учитывая наличие пропусков данных в радиозондовых наблюдениях, для исследования были использованы 243 профиля для зимы и 245 профилей для лета, полученных с аэрологической станции Москва, а также 237 и 240 профилей для зимы и лета соответственно для станции в г. Новосибирск.

Расчет средних в слое значений температуры, зональной и меридиональной составляющих скорости ветра осуществлялся с помощью выражения [4]:

$$\langle \xi \rangle_{h_0, h} = \frac{1}{h - h_0} \int_{h_0}^h \xi(z) dz, \quad (2)$$

где ξ – метеорологическая величина, а знак $\langle \cdot \rangle$ обозначает процедуру усреднения по вертикали в слое $h-h_0$, где h_0 и h – высота нижней и верхней границ этого слоя, причем $h_0=0$ соответствует уровню земной поверхности.

Полагая в выражении (2) $h_0=0$ и $h=h_k$, где h_k – высота верхней границы рассматриваемого k -го слоя атмосферы, и представляя интеграл в виде суммы, это выражение можно записать в виде:

$$\langle \xi \rangle_{h_k, h_0} = \sum_{i=1}^k \left\{ \left(\frac{\xi_{h_{i-1}} + \xi_{h_i}}{2} \right) \left(\frac{h_i - h_{i-1}}{h_k} \right) \right\}, \quad (3)$$

которое и было использовано для расчета средних в слое значений температуры, зональной и меридиональной составляющих скорости ветра.

Для реализации алгоритма калмановской фильтрации, приведенного в [3], в момент времени $k=0$ (момент инициализации), т.е. при полном отсутствии априорной информации, был задан ряд начальных условий, а именно:

- начальный вектор оценивания $\mathbf{x}_0^a = 0$ (т.е. модельные параметры $d_{j,m}=0$), что обусловлено полным отсутствием полезной информации о поведении этих параметров;
- начальная корреляционная матрица шумов наблюдений $\mathbf{R}_k = \mathbf{R}_0$, элементы которой на главной диагонали r_{ii} (при условии, что шумы $\mathbf{\epsilon}_h(k)$ не имеют корреляционных

зависимостей) приняты, исходя из величин ошибок радиозондовых наблюдений [4], равных 0,7 °С (для температуры) и 1,0 м/с (для ортогональных составляющих скорости ветра);

- начальная корреляционная матрица шумов состояния $Q_k = Q_0$, элементы которой на главной диагонали q_{ii} (при условии, что шумы $w(k)$ также не имеют корреляционных зависимостей) задаются равными единице, исходя из предварительного анализа поведения вектора состояния, составленного из неизвестных безразмерных параметров модели (1) [3].

Кроме того, при расчете весовых коэффициентов K_k в линейном фильтре Калмана должна использоваться, согласно [1], ковариационная матрица ошибок оценивания P_k^a , которую также необходимо задавать в момент инициализации этого фильтра. На практике обычно задают $P_k^a = P_o^a$, причем матрица P_o^a является диагональной, элементы которой на главной диагонали должны лежать в пределах $P_{ij}=1, \dots, 100$ (в нашем случае, как показал предварительный анализ, $P_{ij}=10$), а вне главной диагонали они равняются нулю.

Для оценки точности предложенного динамико-стохастического алгоритма целесообразно провести статистическую оценку, с помощью среднеквадратических погрешностей δ_ξ вычисляемую по формуле [4]:

$$\delta_\xi = \left| \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (\xi_{0,k}^a - \xi_{0,k}^0)^2 \right|^{1/2}, \quad (2)$$

а также вероятностей P ошибок экстраполяции температуры и ортогональных составляющих скорости ветра менее и более заданной величины. Результаты оценки приведены в табл. 1 и 2.

Таблица 1

Среднеквадратические погрешности δ_ξ вероятности $P(\times 10^2)$ ошибок экстраполяции профилей температуры и ортогональных составляющих скорости ветра менее и более заданной величины для ст. Москва

Слой, м	Зима					δ_ξ	Лето					δ_ξ
	P						P					
	$\leq \pm 1$	$\leq \pm 2$	$\leq \pm 3$	$\leq \pm 4$	$> \pm 4$		$\leq \pm 1$	$\leq \pm 2$	$\leq \pm 3$	$\leq \pm 4$	$> \pm 4$	
Температура, °С												
0-100	100	100	100	100	0	0,2	100	100	100	100	0	0,2
0-200	96	100	100	100	0	0,4	100	100	100	100	0	0,2
0-300	95	100	100	100	0	0,5	100	100	100	100	0	0,3
0-400	82	100	100	100	0	0,7	98	100	100	100	0	0,3
0-600	81	97	100	100	0	0,8	97	100	100	100	0	0,4
0-800	81	96	100	100	0	0,8	97	100	100	100	0	0,4
0-1000	80	96	100	100	0	0,9	95	100	100	100	0	0,4
0-1200	80	96	100	100	0	0,9	94	100	100	100	0	0,5
0-1600	80	95	100	100	0	0,9	90	100	100	100	0	0,6
Зональная составляющая скорости ветра, м/с												
0-100	98	100	100	100	0	0,3	98	100	100	100	0	0,3
0-200	98	99	100	100	0	0,6	98	100	100	100	0	0,3
0-300	76	95	97	98	2	1,2	97	99	100	100	0	0,5

0-400	62	90	95	96	4	1,7	95	97	100	100	0	0,7
0-600	53	76	93	95	5	1,9	95	97	100	100	0	0,7
0-800	45	66	88	91	9	2,2	94	97	100	100	0	0,7
0-1000	44	64	86	90	10	2,3	94	97	100	100	0	0,7
0-1200	40	62	84	90	10	2,4	89	97	100	100	0	0,8
0-1600	38	60	83	88	12	2,5	83	92	98	100	0	1,0
Меридиональная составляющая скорости ветра, м/с												
0-100	100	100	100	100	0	0,3	100	100	100	100	0	0,1
0-200	90	98	100	100	0	0,6	100	100	100	100	0	0,3
0-300	76	96	98	100	0	0,9	95	100	100	100	0	0,4
0-400	67	90	95	98	2	1,3	94	100	100	100	0	0,5
0-600	52	70	86	98	2	1,8	86	100	100	100	0	0,7
0-800	40	68	84	95	5	2,0	84	100	100	100	0	0,8
0-1000	39	66	84	93	7	2,1	83	100	100	100	0	0,8
0-1200	37	64	83	92	8	2,2	75	98	100	100	0	0,9
0-1600	35	60	83	91	9	2,3	70	94	100	100	0	1,0

Таблица 2

Среднеквадратические погрешности δ_{ξ} вероятности $P(\times 10^2)$ ошибок экстраполяции профилей температуры и ортогональных составляющих скорости ветра менее и более заданной величины для ст. Новосибирск

Слой, м	Зима						Лето					
	P					δ_{ξ}	P					δ_{ξ}
	$\leq \pm 1$	$\leq \pm 2$	$\leq \pm 3$	$\leq \pm 4$	$> \pm 4$		$\leq \pm 1$	$\leq \pm 2$	$\leq \pm 3$	$\leq \pm 4$	$> \pm 4$	
Температура, °C												
0-100	100	100	100	100	0	0,3	100	100	100	100	0	0,2
0-200	92	100	100	100	0	0,5	97	100	100	100	0	0,3
0-300	91	100	100	100	0	0,5	93	100	100	100	0	0,5
0-400	89	100	100	100	0	0,5	93	100	100	100	0	0,5
0-600	89	100	100	100	0	0,6	92	100	100	100	0	0,5
0-800	88	100	100	100	0	0,6	90	100	100	100	0	0,5
0-1000	87	100	100	100	0	0,6	89	100	100	100	0	0,6
0-1200	85	100	100	100	0	0,7	89	100	100	100	0	0,6
0-1600	85	100	100	100	0	0,7	87	100	100	100	0	0,6
Зональная составляющая скорости ветра, м/с												
0-100	98	100	100	100	0	0,4	85	100	100	100	0	0,7
0-200	83	100	100	100	0	0,7	75	96	100	100	0	0,8
0-300	75	98	100	100	0	0,9	68	96	100	100	0	1,0
0-400	65	93	95	100	0	1,1	68	93	100	100	0	1,0
0-600	60	88	95	98	2	1,5	68	93	100	100	0	1,1
0-800	58	88	95	98	2	1,6	67	92	100	100	0	1,1
0-1000	58	85	95	98	2	1,8	67	92	100	100	0	1,1
0-1200	56	85	95	98	2	1,8	66	90	100	100	0	1,2
0-1600	56	84	90	98	2	1,9	65	90	100	100	0	1,2
Меридиональная составляющая скорости ветра, м/с												
0-100	90	98	100	100	0	0,6	91	97	100	100	0	0,6
0-200	78	98	100	100	0	0,8	91	97	100	100	0	0,6
0-300	70	98	100	100	0	0,8	84	95	100	100	0	0,8
0-400	68	98	100	100	0	0,9	77	94	100	100	0	0,9
0-600	68	98	100	100	0	0,9	70	93	100	100	0	1,0
0-800	68	98	100	100	0	0,9	69	93	100	100	0	1,1
0-1000	68	97	99	100	0	1,0	67	90	100	100	0	1,3

0-1200	60	95	98	100	0	1,1	66	92	100	100	0	1,3
0-1600	55	88	98	100	0	1,3	64	88	97	100	0	1,4

Анализ данных табл. 1 и 2 показывает, что использование алгоритма фильтра Калмана с двумерной динамико-стохастической моделью для экстраполяции профилей температуры и ортогональных составляющих скорости ветра действительно дает для всего пограничного слоя и независимо от взятой станции хорошие и приемлемые для практики результаты. Так, например, среднеквадратические погрешности такого восстановления не превышают значений 0,9 °С зимой и 0,6 °С летом (для температуры) и соответственно 2,5 м/с и 1,4 м/с (для зональной и меридиональной составляющих скорости ветра).

Кроме того, о высокой точности данного алгоритма говорят и значения вероятности малых ошибок экстраполяции (менее $\pm 1^\circ\text{C}$ для температуры и менее ± 1 м/с для ортогональных составляющих скорости ветра). Правда, если для температуры вероятность ошибок восстановления менее $\pm 1^\circ\text{C}$ составляет во всем пограничном слое, причем независимо от взятой станции и сезона, более 0,8, то для составляющих скорости ветра вероятность ошибок менее ± 1 м/с варьирует в близких пределах (более 0,64) только в летний период, зимой подобные ее значения отмечаются главным образом лишь в слое 0–400 м.

Заключение

В заключение следует сказать, что предложенный алгоритм, основанный на двумерной динамико-стохастической модели и алгоритме фильтра Калмана, даст более точные результаты экстраполяции при использовании данных, поступающих чаще, чем два раза в сутки. Такими данными могут быть, например, измерения лидарного дистанционного зондирования, обладающего высоким временным разрешением.

Список литературы

1. Браммер К., Зифорлинг Г. Фильтр Калмана-Бьюси / пер. с немецк. – М.: Наука. 1982, 200 с.
2. Бызова И. Л., Лунина А. А., Хачатурова О. М. О восстановлении профилей вектора ветра по данным наземной метеостанции // Труды ИЭМ. – 1987. – Вып. 41 (126). – С. 25–50.
3. Горев Е. В., Комаров В. С., Лавриненко А. В., Будаев В. В. Численное восстановление профилей температуры и ветра в пограничном слое атмосферы на основе алгоритма фильтра Калмана и двумерной динамико-стохастической модели. Часть 1. Методические основы // Оптика атмосферы и океана. – 2008. – Т. 21. – № 04. – С. 323–326.

4. Комаров В. С. Статистика в приложении к задачам прикладной метеорологии. – Томск: Изд-во СО РАН, 1997. – 255 с.
5. Комаров В. С., Лавриненко А. В., Будаев В. В., Горев Е. В. Численное восстановление полей температуры и ветра в области мезо- β -масштаба на основе динамико-стохастического подхода // Оптика атмосферы и океана. – 2008. – Т. 21. – № 11. – С. 952–956.
6. Марченко А. С., Минакова Л. А., Семочкин А. Г. Восстановление вертикальных профилей температуры и ветра методом статистической экстраполяции // Применение статистических методов в метеорологии. – Новосибирск: Изд. ВЦ СО АН СССР, 1971. – С. 82–113.
7. Komarov V. S., Popov Yu. B. Applicability of the regression methods to reconstruction of missing data in lidar sensing of the atmosphere // Proc. of SPIE. – 1999. – V. 3983. – P. 591–599.

Рецензенты:

Белан Борис Денисович, д.ф.-м.н., профессор, зам. директора по научной работе, Институт оптики атмосферы СО РАН, г. Томск.

Комаров Валерий Сергеевич, д.г.н., профессор, главный научный сотрудник, Институт оптики атмосферы СО РАН, г. Томск.