Параллельный алгоритм усвоения спутниковых данных измерений

Н.Н. Богословский

Томский государственный университет, Томск

Рассматривается параллельный алгоритм усвоения спутниковых данных измерения влажности почвы. Данный алгоритм основан на методах оптимальной интерполяции и позволяет вычислить начальные значения объемного влагосодержания поверхностного слоя почвы для глобальной модели численного прогноза погоды ПЛАВ. Описана параллельная реализация алгоритма.

Введение

Современная метеорология характеризуется бурным развитием математических моделей атмосферы и их применением для численных расчетов прогнозов погоды. Одним из механизмов повышения качества прогнозов является уточнение начальных данных модели. В системах усвоения данных наблюдений наряду со станционными измерениями все большее значение приобретают спутниковые данные измерений. Особенно это актуально для территории России, где густота наблюдательной сети недостаточная.

Влагосодержание почвы может оказать существенное влияние на приземную температуру и влажность, низкую облачность и осадки, так как значительно влияет на обмен тепла и влаги между поверхностью земли и атмосферой. Влагосодержание почвы может значительно меняться от одной точки поверхности до другой, даже для точек, расположенных относительно близко друг к другу. Это связано как с сильной пространственной изменчивостью почвенных характеристик, так и с влиянием внешних факторов на влагосодержание почвы, например неоднородным распределением осадков. В связи с этим прямые измерения, сделанные в одной точке, не так информативны о характеристиках почвы в других точках. Это одна из причин того, что в настоящее время не существует обширной глобальной наблюдательной сети для прямого измерения влажности почвы. Поэтому актуальной является задача оценки влагосодержания почвы с привлечением спутниковых измерений.

В работе рассматривается усвоение измерений влагосодержания поверхностного слоя почвы, полученных на основе спутниковых данных ASCAT (Advanced Scatterometer) [2, 3].

Метод усвоения спутниковых данных измерений влажности почвы

Для того, чтобы проверить целесообразность использования спутниковых данных измерений для инициализации почвенных переменных и оценить эффект от использования этих данных в системе усвоения, была использована упрощенная схема усвоения, основанная на оптимальной интерполяции. Усвоение для каждой точки расчетной сетки производится независимо от других.

Пусть ошибки наблюдений и ошибки поля первого приближения не коррелируют между собой. Тогда можно записать следующие уравнение для нахождения поля анализа влагосодержания поверхностного слоя почвы [4]:

$$\theta_a = \theta_b + K(\theta_{scat} - \theta_b), \qquad (1)$$

где θ_a – искомое влагосодержание поверхностного слоя почвы, которое будет использоваться в качестве начального условия в модели; θ_{scat} – влагосодержание поверхностного слоя почвы по данным спутниковых измерений в точке, наиболее близкой к точке сетки, в которой проводится расчет; θ_b – значение первого приближения для влагосодержания поверхностного слоя почвы в точке сетки, в которой производится расчет (как правило, в качестве первого приближения берется прогноз по модели на срок 6 часов, который был сделан 6 часов назад); K – константа, которая не зависит от пространства и времени.

Для определения оптимального значения константы K, которое позволяет минимизировать ошибку поля анализа, воспользуемся уравнением (1), переписав его следующим образом:

$$\theta_a = (1-K)\theta_b + K\theta_{scat}.$$

Пусть дисперсия ошибки поля первого приближения равна σ_b, а дисперсия ошибки спутниковых измерений равна σ_o. Как отмечалось ранее, предполагаем, что ошибки поля первого приближения и наблюдений не коррелируют между собой, тогда дисперсия ошибки поля анализа равна

$$\sigma_a^2 = (1-K)^2\sigma_b^2 + K^2\sigma_o^2. \qquad (2)$$

Как видно из данного уравнения, для минимизации дисперсии ошибки поля анализа необходимо, чтобы константа K вычислялась по следующей формуле:

$$K = \frac{\sigma_b^2}{\sigma_b^2 + \sigma_o^2}.$$

К сожалению, точно вычислить ошибки поля первого приближения и наблюдений, а соответственно и их дисперсию, нельзя, поэтому предположим, что $\sigma_b \simeq \sigma_o$, тогда согласно вышеприведенной формуле $K = 0,5$.

Используя уравнение (1) и рассчитанное значение константы K, приведём окончательное выражение для расчета поля анализа влагосодержания слоя почвы.

$$\theta_{a,l} = \begin{cases} \theta_{b,1} + 0,5 * F_1 * F_2(\theta_{scat} - \theta_b), & l = 1 \\ \theta_{b,2} & , l = 2, \end{cases} \quad (3)$$

где l принимает значение 1 или 2 для поверхностного и глубинного слоя почвы соответственно; F_1 – функция, принимающая значение, равное 0, если в точке расчета имеется снежный покров, и 1, если отсутствует; F_2 – функция, принимающая значение 0, если температура поверхностного слоя почвы ниже 275,15К, и 1, если выше 275,15К.

Исследование эффективности и точности задания начальных данных для влагосодержания поверхностного и глубинного слоя почвы по разработанному методу

Для проверки эффективности и точности задания начальных значений влагосодержания поверхностного и глубинного слоя почвы проводилось сравнение с реальными данными измерений влагосодержания на наземных научных станциях сети AmeriFlux. Для этого проводилось усвоение спутниковых данных измерений для июня 2012 года. Усвоение выполнялось каждые 6 часов. Для выбранных станций проводились сравнения станционных данных и значение влагосодержания поверхностного и глубинного слоя почвы полей объективного анализа. На рис. 1 приведено сравнение влагосодержания для июля 2012 года по станции Willow Creek (45,8060 С.Ш.; 90,0798 В.Д.). Точками на графике обозначены данные со станции, пунктирной линией – данные влагосодержания поверхностного слоя почвы без усвоения спутниковых данных. Сплошной линией отмечено влагосодержание при усвоении спутниковых данных измерений. Как видно из графика, усвоение спутниковых данных позволило уменьшить ошибку инициализации влагосодержания поверхностного слоя почвы. Среднее отклонение для станции Willow Creek уменьшилось на 0,1 $м^3/м^3$, а среднеквадратичная ошибка уменьшилась на 0,013 $м^3/м^3$.

Аналогичные сравнения были проведены для еще 6 станций (GLEES, OR – Metolius-intermediate aged ponderosa pine, WA – Wind

River Crane Site, WI – Park Falls/WLEF, Freeman_Ranch_Woodland, AZ – Santa Rita Mesquite). Уменьшение средней ошибки составило 0,07 $м^3/м^3$, а уменьшение среднеквадратичной ошибки – 0,01 $м^3/м^3$.

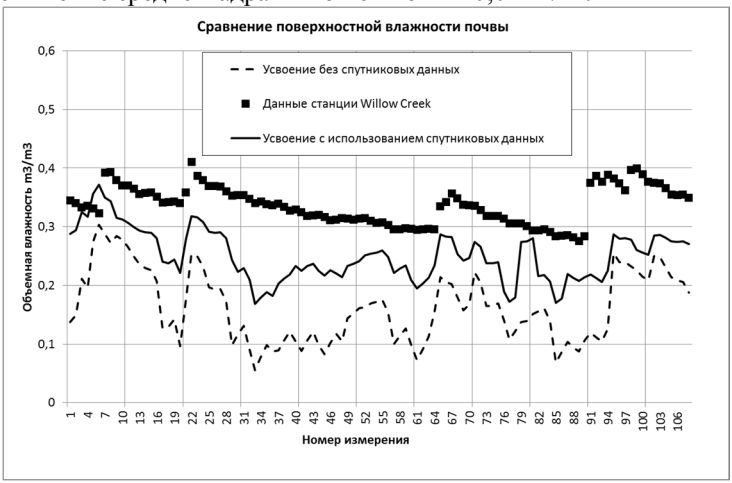


Рис. 1. Сравнение влагосодержания поверхностного слоя почвы

Так как усвоение спутниковых данных проводится только для верхнего слоя почвы, то влияние на влагосодержание глубинного слоя почвы незначительное.

Разработка параллельного алгоритма инициализации почвенных переменных

Одной из сложностей в усвоении данных является вычислительная сторона алгоритма. Большая размерность задач не позволяет их решать на персональных компьютерах. Еще одно из ограничений, накладываемых в задаче усвоения данных наблюдений, – это временное ограничение. Это связано с тем, что при усвоении данных наблюдений в задачах численного прогноза погоды в оперативном режиме необходимо получить анализ в определенный временной интервал. Соответственно, эффективность реализации численного алгоритма является важной составляющей. Поэтому для данных алгоритмов в обязательном порядке требуется проводить распараллеливание.

Увеличение производительности современных вычислительных систем производится не только за счет увеличения числа процессоров, но и за счет увеличения количества ядер в каждом процессоре. Следовательно, необходимо проводить распараллеливание не просто с

использованием какой-либо определенной параллельной технологии, но и с учетом архитектурных особенностей. В связи с этим распараллеливание необходимо проводить как с помощью OpenMP (технология программирования для систем с общей памятью), так и с помощью MPI (технология программирования для систем с распределенной памятью).

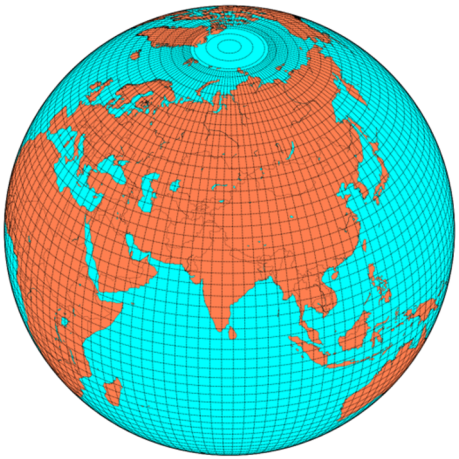


Рис. 2. Один вертикальный уровень широтно-долготной сетки модели ПЛАВ

На рис. 2 представлен один вертикальный уровень расчетной широтно-долготной сетки модели ПЛАВ [1]. Усвоение спутниковых данных для инициализации почвенных переменных проводится для каждой точки сетки. Расчеты в каждой из точек производятся независимо от расчетов в других точек. Так как нет зависимости, то расчеты в разных точках могут проводиться параллельно. Для параллельной реализации расчетов была выбрана двумерная декомпозиция по данным.

Вся расчетная сетка разбивается на подобласти в соответствии с имеющимся количеством MPI-процессов. Внутри каждой такой подобласти расчеты распараллеливаются с использованием технологии OpenMP. Использование технологии распараллеливания OpenMP позволяет эффективно проводить расчеты внутри одного расчетного узла, так как все ядра имеют доступ к общей памяти.

Тестирование и оптимизация параллельного алгоритма проводились для вычислительного кластера Томского государственного университета СКИФ Cyberia.

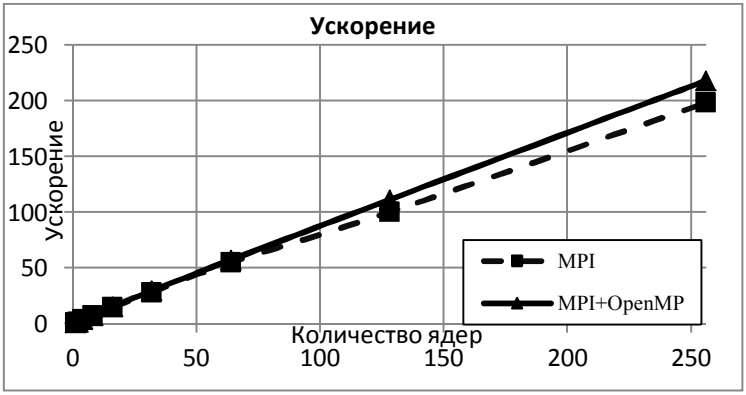


Рис. 3. Ускорение программы усвоения спутниковых данных

Было проведено два вычислительных эксперимента. В первом вычислительном эксперименте для распараллеливания использовалась только технология MPI. Таким образом, не была учтена архитектура вычислительно кластера, в котором на общей памяти располагается 12 вычислительных ядер. Во втором вычислительном эксперименте для распараллеливания использовалась как технология MPI, так и технология OpenMP. В данном эксперименте на одном вычислительном узле запускался 1 процесс MPI и внутри него создавалось 12 нитей OpenMP. На рис. 3 приведен график ускорения. Пунктирной линией на графике показано ускорение при распараллеливании с использованием только технологии MPI, сплошной линией представлен график ускорения при использовании MPI+OpenMP.

Как видно из графика, благодаря применению гибридной технологии распараллеливания удалось увеличить ускорение. Так, при расчетах с использованием 256 ядер ускорение программы при распараллеливании только с использованием MPI составило около 198, ускорение же при использовании гибридной технологии MPI+OpenMP составило 220, что на 10% больше при использовании только MPI.

Литература

1. *Толстых М.А., Богословский Н.Н., Шляева А.В., Мизяк В.Г.* Оперативная технология расчета глобальных прогнозов с помощью полулагранжевой модели атмосферы ПЛАВ // Труды

Гидрометеорологического научно-исследовательского центра Российской Федерации. 2011. № 346. С. 145–154.

2. *Bartalis Z., Wagner W., Naeimi V., Hasenauer S., Scipal K., Bonekamp K., Figa J., Anderson C.* Initial soil moisture retrievals from the METOP-A Advanced Scatterometer (ASCAT) // Geophysical Research Letters. 207. V. 34. L20, 401, doi:10.1029/2007GL031088.

3. *Bartalis Z., Naeimi V., Hasenauer S., Wagner W.* ASCAT Soil Moisture Product Handbook // ASCAT Soil Moisture Report Series, 2008, N. 15, Institute of Photogrammetry and Remote Sensing, Vienna University of Technology, Austria.

4. *Scipal K., Drusch M., Wagner W.* Assimilation of a ERS scatterometer derived soil moisture index in the ECMWF numerical weather prediction system // Advances in water resources. 2008. V.31 (8). P.1101–1112.