

## МОДЕРНИЗАЦИЯ МЕТОДА SADM-GPS

**В.В. Черемисин, С.В. Воейков**

Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, Россия  
cheremisin\_victor@mail.ru

## UPGRADING THE SADM-GPS METHOD

**V.V. Cheremisin, S.V. Voeikov**

Institute of Solar-Terrastrial Physics SB RAS, Irkutsk, Russia  
cheremisin\_victor@mail.ru

**Аннотация.** Данная работа посвящена модернизации метода SADM, для повышения точности вычисления скорости движения ПИВ. Простое моделирование показало существенное (почти в 4 раза) уменьшение разброса в определении скорости ПИВ при использовании модернизированного метода. Новый метод получил название STGM (Spatio-Temporal Gradient Method).

**Ключевые слова:** ГНСС, ПИВ, SADM, STGM.

**Abstract.** This work is devoted to upgrading SADM method for improving the accuracy of calculating the velocity of TID. A simple simulation showed a significant (almost 4 times) reduction of scatter in determining the TID velocity by using the upgraded method. A new method called STGM (Spatio-Temporal Gradient Method).

**Keywords:** GNSS, TID, SADM, STGM.

### ВВЕДЕНИЕ

Известно, что ионосфера Земли служит индикатором различного рода воздействий как естественного, так и техногенного происхождения (проявление солнечной активности, землетрясения, цунами, грозы, взрывы и т. д.). Определение параметров перемещающихся ионосферных возмущений (ПИВ) является важной задачей в изучении ионосферы Земли. Используются различные методы по расчету характеристик ПИВ, в частности и SADM (SADM-GPS). Положительные моменты метода SADM — малый объем вычислений, следовательно высокая скорость работы, и достаточная точность определения азимута движения ПИВ. Ключевая проблема — большой разброс определения скорости ПИВ.

В данной работе предложена модификация SADM с целью повысить точность определения скорости. Рабочее название измененного метода STGM (Spatio-Temporal Gradient Method).

### КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ SADM

В 1995 г. Э.Л. Афраймович [Afraimovich, 1997] разработал статистический угломерно-доплеровский метод SADM (Statistical Angle-of-arrival and Doppler Method) определения характеристик движения перемещающихся ионосферных возмущений (ПИВ) при трансionoсферном зондировании на основе измерений пространственных производных вариаций ПЭС и их производной по времени. Это дает возможность установить однозначную ориентацию азимута  $\alpha(t)$ , а также определить модуль горизонтальной проекции скорости  $V_h(t)$  ПИВ. Полное описание метода SADM приведено в [Афраймович, Перевалова, 2006]. В качестве исходных данных в методе SADM используются ряды  $dI(t)$  вариаций полного электронного содержания (ПЭС), отфильтрованные в выбранном диапазоне периодов, с трех приемных станций (А, В и С).

В данной статье мы рассмотрим упрощенный вариант метода для двух приемных станций (А и В). Данное допущение достаточно для нашей цели по-

казать проблемы SADM и рассмотреть возможности его модернизации.

Рассматриваем ПИВ в виде плоской бегущей волны ПЭС

$$dI(t, x) = I_0 \sin \varphi(t) = I_0 \sin(\Omega t - K_x x + \varphi_0). \quad (1)$$

Первые производные вариаций ПЭС для такой модели:

$$I'_t = \Omega I_0 \cos \varphi(t), \quad I'_x = K_x I_0 \cos \varphi(t) \quad (2)$$

а значение скорости ПИВ в каждый момент времени определяются соотношением:

$$V_x(t) = \Omega / K_x = I'_t(t) / I'_x(t) \quad (3)$$

где  $V_x(t)$  — скорость перемещения волнового фронта вдоль оси  $x$ , соединяющей две приемные станции (А и В).

Пространственная  $I'_x(t)$  и временная  $I'_t(t)$  производные рассчитываются по формулам:

$$I'_t(t) = \frac{dI_A(t + \Delta t) - dI_A(t - \Delta t)}{2\Delta t}$$

$$I'_x(t) = \frac{dI_B(t) - dI_A(t)}{\Delta x} \quad (4)$$

где  $dI_A$ ,  $dI_B$  — значения ПЭС в определенные временные отсчеты;  $\Delta t$  — интервал между временными отсчетами;  $\Delta x$  — расстояние между приемными станциями. Таким образом, в методе SADM пространственная производная  $I'_x(t)$  рассчитывается для средней точки между А и В, а временная производная  $I'_t(t)$  только для точки А. В формуле (3) используется отношение величин, рассчитанных в разных точках пространства (хоть и близких), что должно приводить к некой дополнительной ошибке в определении скорости.

### ПРЕДЛАГАЕМЫЕ УЛУЧШЕНИЯ МЕТОДА SADM

Нами предлагается временную производную  $I'_t(t)$ , как и пространственную, рассчитывать для средней точки между приемными станциями. С этой целью, в качестве временной производной в формуле (3)

использовать среднее значение между временными производными, полученными на двух приемниках.

На рис. 1 представлены результаты вычисления скорости при использовании методов SADM и STGM. Смоделировано ПИВ в виде синусоиды, движущейся вдоль линии между двумя станциями со скоростью 400 м/с. На верхней панели черной и красной линиями даны модельные ряды ПЭС на двух станциях. На нижней панели черными и красными точками представлены значения скорости, рассчитанные методами SADM и STGM, соответственно. Скорости, полученные методом SADM, имеют большой разброс (от -150 м/с до 800 м/с) при наиболее вероятном значении около 390 м/с. Видно, что соответствующий ряд скоростей близок к периодической функции с периодом близким к полупериоду ПИВ. Наибольшие отклонения скорости от среднего достигаются вблизи точек пересечения двух рядов ПЭС. В то же время, при использовании метода STGM, мы получили значение скорости (~385 м/с) практически без разброса. Таким образом, хотя SADM и STGM дали достаточно близкую оценку скорости ПИВ (хоть и несколько заниженную), предложенный метод STGM демонстрирует существенно большую устойчивость в определении скорости.

На рисунке 2 представлен более реалистичный смоделированный вариант ПИВ, со скоростью 400 м/с, в виде волнового пакета. Обозначения такие же, как на рис. 1. В этом случае скорости, рассчитанные методом STGM и SADM, имеют разброс, в основном, от 300 м/с до 500 м/с и от -50 м/с до 700 м/с, соответственно. Видно, что применение наших улучшений позволяет существенно уменьшить разброс (почти в 4 раза) определения скорости. Наиболее вероятное значение скорости, определенное с помощью STGM (~385 м/с), ближе к моделируемой скорости, чем определенное методом SADM (~350 м/с). Как и в случае синусоидального ПИВ наибольшие отклонения скорости от среднего наблюдаются вблизи точек пересечения двух рядов ПЭС.

Анализ рис. 1 и 2 позволяет сделать предположение, что более точный расчет значений скорости ожидается на временных отсчетах, когда временные производные рядов ПЭС на обеих станциях максимально

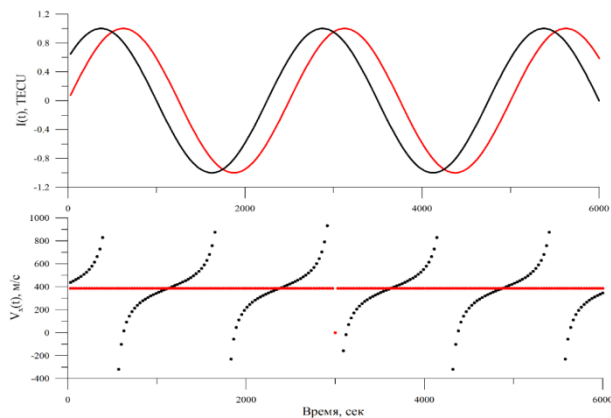


Рис. 1. Моделирование расчета скорости синусоидального ПИВ

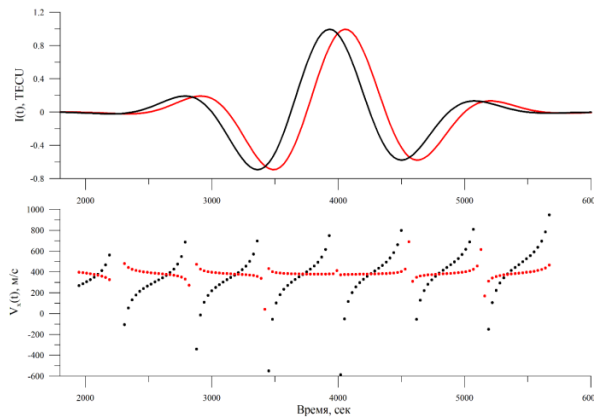


Рис. 2. Моделирование расчета скорости ПИВ в виде волнового пакета

похожи, в идеале равны друг другу. Для поиска таких временных отсчетов необходимо анализировать разницу временных производных  $dl_A/dt$  и  $dl_B/dt$  (на двух станциях).

На полупериодах ПИВ с амплитудой выше определенного порога, определяются значения временных отсчетов, в которых достигается минимальная разность  $\left| \frac{dl_A}{dt} - \frac{dl_B}{dt} \right|$  (модуль разницы временных производных на двух станциях). Далее производится расчет скоростей для данных отсчетов с последующим усреднением по полупериодам. Ограничение по амплитуде при выборе полупериодов позволяет уменьшить влияние фоновых возмущений (с меньшей амплитудой) на определение скорости исследуемого ПИВ.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе предложен метод STGM как модификация SADM, с целью повышения точности вычисления скорости ПИВ. Основными моментами в методе STGM являются:

- выбор полупериодов рядов ПЭС с амплитудой больше заданной;
- для каждого из выбранных полупериодов поиск временного отсчета  $t_{\min_i}$ , когда достигается минимальное значение  $\left| \frac{dl_A}{dt} - \frac{dl_B}{dt} \right|$ , (модуль разницы временных производных на двух станциях);

для найденных временных отсчетов  $t_{\min_i}$  временная производная  $dl/dt$  определяется как среднее между производными  $dl_A/dt$  и  $dl_B/dt$  взятыми по двум станциям;

- расчет скоростей движения ПИВ для временных отсчетов  $t_{\min_i}$  с последующим их усреднением по полупериодам.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 19-05-00889).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Афраймович Э.Л., Перевалова Н.П. GPS-мониторинг верхней атмосферы Земли. Иркутск : ГУ НЦ РВЧ ВСНЦ СО РАН, 2006. 480 с.