

АНАЛИЗ КОРРЕЛЯЦИОННЫХ СВЯЗЕЙ ФЛЮКТУАЦИОННОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ ИОНОСФЕРНЫХ ЗАДЕРЖЕК GPS ИЗМЕРЕНИЙ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО РЕЖИМА КОРРЕКЦИИ

А.С. Петренко

(Объединенный научно-исследовательский институт ВС Украины, Харьков)

Проведен анализ корреляционных свойств ионосферных задержек навигационного сигнала при GPS измерениях с целью учета характера их изменения (пространственной и временной деградации поправок потребителям от контрольно-корректирующих станций) при разработке методов компенсации данной составляющей погрешности измерения в аппаратуре потребителей (АП) с использованием режима дифференциальной коррекции. Предложена модель, описывающая пространственную и временную деградацию ионосферных поправок от контрольно-корректирующих станций (ККС).

спутниковые радионавигационные системы, ионосферная задержка, контрольно-корректирующая станция

Постановка проблемы. В настоящее время для решения многих прикладных задач большое значение приобретает проблема высокоточных навигационно-временных определений (НВО) по информации от спутниковых радионавигационных систем (СРНС). Неоднородность диэлектрической проницаемости ионосферы вызывает искривление траектории навигационного сигнала, что приводит к дополнительным задержкам его распространения от навигационного спутника (НС) до приемника, которые обычно пересчитываются в поправки к псевдодальностям и оцениваются величинами, лежащими в пределах от 5 до 150 метров. Вклад ионосферной погрешности в определении вектора положения потребителя составляет порядка 5 – 10 метров [2].

В настоящее время известны следующие методы определения и учета ионосферной задержки: моделирование условий на трассе распространения сигналов НС, двухчастотное измерение, избыточные одночастотные измерения. Наиболее эффективными мерами борьбы с влиянием ионосферы являются методы, базирующиеся на двухчастотных измерениях, однако они требуют высокоточных измерений на двух частотах, что значительно усложняет аппаратуру потребителя, а при решении многих прикладных задач необходимо исходить из минимальных возможностей приемника, т.е. использование C/A-кода на частоте L1.

Одним из эффективных путей повышения точности НВО по информации от глобальных СРНС является применение режима дифференциальной коррекции. В основе метода дифференциальной навигации лежит относительное постоянство значительной части погрешностей СРНС во времени и в пространстве, в том числе и ионосферных погрешностей, изменчивость которых характеризуется пространственно-временной корреляционной функцией. Существенным недостатком данного метода является тот факт, что размеры рабочей области одной ККС ограничены по причине пространственной декорреляции. Считается [2], что локальные ККС имеют максимальную дальность действия до 50 ... 200 км. Однако на практике потребитель при определении своего вектора положения не всегда может находиться в ближней рабочей зоне ККС.

Анализ последних достижений и публикаций. Проблеме компенсации ионосферных задержек в режиме широкозонной дифференциальной навигации (WADGPS – Wide Area Differential GPS) и расширения зоны действия ККС в современной литературе уделено достаточно большое внимание. Рассматриваемый в [1] способ объединения сети ККС дифференциальных подсистем СРНС ГЛОНАСС и GPS в централизованную систему и интерполяции дифференциальных поправок на всю территорию, охватываемую группой дифференциальных станций, позволяет расширить полезную площадь дифференциальных определений в 5 ... 7 раз по сравнению с суммарной площадью локальных зон действия всех контрольных станций. В работе [7] описан алгоритм обработки корректирующей информации (КИ) от нескольких ККС, позволяющий повысить надежность навигации в дифференциальном режиме за счет избыточности КИ и частично компенсировать эффект пространственной деградации поправок на больших удалениях потребителя от контрольно-корректирующих станций. В [3] представлен метод адаптивной компенсации влияния ионосферы на спутниковые навигационные измерения, позволяющий сформировать необходимое для компенсации, значение ионосферной задержки в одночастотной аппаратуре потребителя с точностью, сопоставимой с точностью двухчастотного метода, т.е. на уровне флюктуационной (шумовой) составляющей погрешности измерений.

В настоящее время для аналитического описания коэффициентов ковариации, как функции от расстояния между приемными пунктами (между ККС сети либо между ККС и аппаратурой потребителя) в известной литературе [5] используется, например экспоненциальная модель вида:

$$\rho(l) = e^{-l/l_{\text{ion}}}, \quad (1)$$

где l – расстояние между потребителем и одной из ККС сети; l_{ion} – параметр, соответствующий расстоянию между двумя пунктами, при котором

значение $\rho(l)$ составляет e^{-1} . В дальнейшем данная модель используется для весовой обработки корректирующей информации от сети ККС.

Формулировка целей статьи. Целью статьи является усовершенствование модели пространственно-временной декорреляции ионосферных поправок аппаратуре потребителя за счет использования ее адаптивно уточняемых параметров в интересах весовой обработки корректирующей информации каждой дифференциальной станции сети при разработке методов компенсации ионосферной погрешности навигационных определений.

Изложение основного материала. Ионосфера является нестационарной и существенно неоднородной по своей пространственной структуре средой с широким спектром характерных пространственных и временных масштабов. Неоднородную структуру ионосферы принято разделять, по крайней мере, на две части: на регулярную неоднородную часть и нерегулярную неоднородную часть.

$$\widehat{\Delta D}_{\text{ион}i} = \widehat{\Delta D}_{\text{ион}i}^{\text{рег}} + \widehat{\Delta D}_{\text{ион}i}^{\text{фл}} = \widehat{\Delta D}_{\text{ион}i}^{\text{рег}} + \widehat{\Delta D}_{\text{ион}i}^{\text{сл}} + \xi_j, \quad (2)$$

где $\widehat{\Delta D}_{\text{ион}i}^{\text{рег}}$ – результирующая погрешность измерения псевдодальности до навигационного космического аппарата приемоизмерителем потребителя; $\widehat{\Delta D}_{\text{ион}i}^{\text{рег}}$ – регулярная составляющая ионосферной погрешности; $\widehat{\Delta D}_{\text{ион}i}^{\text{сл}}$ – случайная составляющая ионосферной погрешности; ξ_j – шумовая составляющая оценки ионосферной погрешности j -й ККС.

В качестве оценки регулярной составляющей ионосферной задержки $\widehat{\Delta D}_{\text{ион}i}^{\text{рег}}$ в режиме реального времени может быть использован предложенный в [3] метод адаптивной компенсации влияния ионосферы на спутниковые радионавигационные измерения в одночастотной аппаратуре потребителя. При решении навигационной задачи в послесансном режиме для оценки систематической ионосферной погрешности могут быть применены данные о состоянии ионосферы, так называемые, ионосферные карты, предоставляемые в сети Internet швейцарским научным центром CODE международной службы IGS. Эти данные получены в результате обработки суточных измерений наклонных ионосферных задержек 150 двухчастотных станций. Они представляют собой значения интегральной электронной концентрации (Total Electronic Content – TEC) в вертикальном направлении относительно сетки с шагом 5° по географической долготе и $2,5^\circ$ по географической широте, с дискретностью 2 часа по времени с линейной аппроксимацией отсутствующих данных между точками сформированной “решетки” [8]. Так же могут быть использованы любые другие модели. Например,

пусть в качестве оценки регулярной составляющей ионосферы будет использоваться арифметическое среднее вертикальных ионосферных задержек в измерениях каждой из ККС сети по всем видимым этими дифференциальными станциями спутникам. Для этого необходимо пересчитать наклонные ионосферные задержки на каждой трассе распространения навигационного сигнала в вертикальные задержки по формуле [2]:

$$\Delta D_{\text{ион}}^{\text{верт}} = \Delta D_{\text{ион}}^{\text{накл}} \cos z', \quad (3)$$

где z' – угол между линией визирования на спутник и нормалью к Земле от точки “прокола” – ионосферной точки (IP – ionosphere point). После этого на некоторые фиксированные моменты времени получаем среднее арифметическое вертикальных ионосферных задержек $\overline{\Delta D_{\text{ион } i}^{\text{верт}}}$ по измерениям всех ККС сети от всех навигационных спутников ($i = 1 \dots M$) – на всех рассматриваемых трассах распространения навигационных сигналов как

$$\overline{\Delta D_{\text{ион } i}^{\text{верт}}} = \sum_{i=1}^M \Delta D_{\text{ион } i}^{\text{верт}} / M. \quad (4)$$

Полученное таким образом среднее вычитается из каждого из используемых в обработке значения вертикальной ионосферной задержки, а затем полученные “невязки” $\Delta D_{\text{ост } \text{ион } i}^{\text{верт}}$ пересчитываются обратно на наклонные трассы соответственно по формуле:

$$\Delta D_{\text{ост } \text{ион } i}^{\text{накл}} = \frac{\Delta D_{\text{ост } \text{ион } i}^{\text{верт}}}{\cos z'}. \quad (5)$$

$\Delta D_{\text{ост } \text{ион } i}^{\text{накл}}$ представляют собой нескомпенсированные коррелированные остатки (невязки) и являются смесью флуктуационной составляющей ионосферных задержек и шумов аппаратуры $\widehat{\Delta D}_{\text{ион } i}^{\text{сл}} + \xi_j$.

На рис. 1 приведены гистограммы полученных на основе обработки RINEX файлов дневных измерений девятнадцати станций международной сети IGS за 28 июня 2004 года, а именно UZHL (Ужгород, Украина), POLV (Полтава, Украина), POTS (Potsdam, Германия), RAMO (Mitzpe Ramon, Израиль), SULP (Львов, Украина), WROC (Wroclaw, Польша), WTZR (Koetzing, Германия), MEDI (Medicina, Италия), MATE (Matera, Италия), LAMA (Olsztyn, Польша), KHAR (Харьков, Украина), JOZE (Jozefoslaw, Польша), JOZ2 (Jozefoslaw, Польша), GOPE (Ondrejov, Чехия), GLSV (Голосеево, Украина), BOR1 (Borowiec, Польша), SBGZ (Salzburg, Австрия), ZOUF (Cercivento, Италия), BZRG (Bolzano – Bozen, Италия) невязок для 9 из рассматриваемых опорных станций на двухчасовом интервале наблюдений.

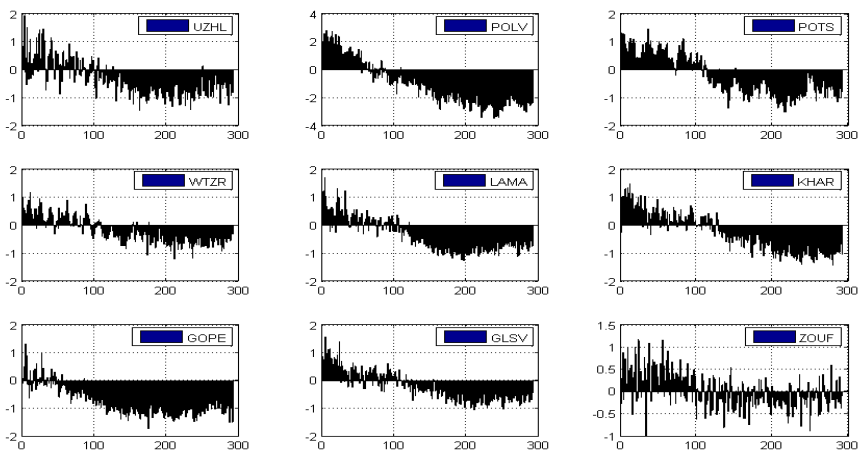


Рис. 1. Гистограммы полученных на основе обработки RINEX файлов дневных измерений девятнадцати станций международной сети IGS за 28 июня 2004 года

На основе полученных значений $\Delta D_{\text{ост ион}}^{\text{накл}}$ рассчитаны значения коэффициентов ковариации полученных невязок. В табл. 1 представлены процентные соотношения $\Delta B_{\text{ост ион}}^{\text{накл}}$ и $\Delta B_{\text{ион}}^{\text{рег}}$.

Предлагается использовать модель зависимости коэффициентов ковариации от расстояния между пунктами с адаптивно уточняемыми на основе информации сети ККС параметрами вида

$$\rho(l) = e^{-\alpha l^v}, \quad (6)$$

где $\alpha = 1/l_{\text{ион}}$; v – свободный параметр. Например, при $v = 1$, модель будет экспоненциальной, т.е. соответствует общепринятой модели (1), при $v = 2$ – гауссидой, представленной на рис. 2 пунктирной кривой.

Таблица 1

Процентные соотношения

Станц.	M, %	σ , %	max, %	min, %
UZHL	19,46	12,08	53,24	0,09
POLV	41,43	25,33	97,53	0,09
POTS	30,17	14,68	68,87	0,09
RAMO	38,29	5,27	53,78	24,25
SULP	77,83	47,19	162,44	0,35
WROC	28,76	14,04	56,67	0,06
WTZR	17,25	10,65	52,65	0,33
MEDI	25,93	15,24	65,72	0,01
MATE	7,312	5,69	26,65	0,02
LAMA	22,52	13,69	57,17	0,01
KHAR	22,29	14,52	54,64	0,15
JOZE	47,92	27,45	126,32	0,04
JOZ2	31,57	15,68	79,44	1,12
GOPE	29,82	15,74	67,05	0,04
GLSV	18,42	11,52	46,46	0,23
BOR1	46,54	16,45	75,92	4,95
SBGZ	15,76	11,03	39,66	0,05
ZOUF	10,34	7,975	40,56	0,02
BZRG	36,51	17,23	54,19	0,07

Сплошная кривая на рис. 2 иллюстрирует предлагаемую модель пространственной деградации дифференциальных поправок. Анализ данного графика позволяет сделать вывод о том, что вид пространственной декорреляции ионосферных поправок имеет форму некоторой кривой между экспонентой и гауссидой.

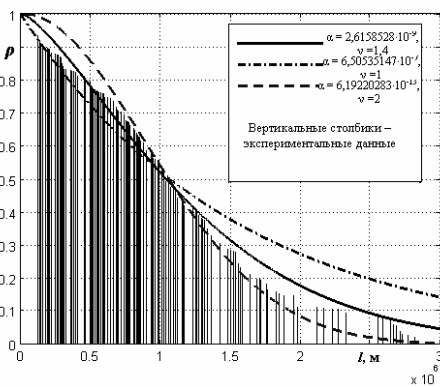


Рис. 2. Модель пространственной деградации дифференциальных поправок

В частности при обработке данных опорных станций на рассматриваемом временном интервале свободный параметр $\nu = 1,4$.

Получены также, представленные на рис. 3 для трех из рассматриваемых станций, графики коэффициентов автокорреляции, позволяющие сделать вывод о том, как долго во времени дифференциальные поправки от ККС могут быть использованы потребителем, т.е.

временной радиус корреляции ионосферных поправок.

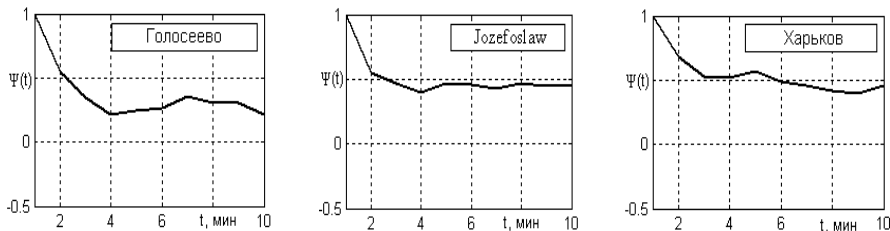


Рис. 3. Графики коэффициентов автокорреляции

Из приведенных графиков видно, что за время около 2 минут коэффициент автокорреляции рассмотренных станций падает примерно до уровня 0,5.

По аналогии с теорией радиолокации [6] от выбора функции корреляции зависит число компенсационных каналов – в нашем случае количество пространственно разнесенных ККС. Так, например, при экспоненциальной функции корреляции оптимальной будет двухканальная схема компенсации, а при гауссовой – количество компенсационных каналов оптимальной системы стремится к бесконечности. В качестве теоретической оценки эффективности системы адаптивной компенсации ионосферной задержки на основе использования информации от сети ККС так же по аналогии с тео-

рией радиолокации используем такой показатель, как функциональная зависимость остаточной нормированной дисперсии флюктуационной составляющей ионосферной погрешности при ее адаптивной компенсации от количества и геометрии расположения опорных станций.

Аналитическое выражение для значения нормированного остаточного СКО флюктуационной составляющей ионосферной погрешности имеет вид:

$$\sigma_{\text{ост}}^{\text{норм}} = 1 - \tilde{\mathbf{P}}^T(\mathbf{l}) \mathbf{K}_{\Pi}^{-1} \tilde{\mathbf{P}}^T(\mathbf{l}), \quad (7)$$

где \mathbf{K}_{Π} – оценка корреляционной матрицы случайной составляющей погрешности (с шумами) системы ККС. Размерность \mathbf{K}_{Π} равна числу ККС, $\tilde{\mathbf{P}}^T$ – вектор вида: $\tilde{\mathbf{P}}^T = \left\| \sigma_1 \rho_{\Pi 1} \quad \sigma_2 \rho_{\Pi 2} \quad \sigma_3 \rho_{\Pi 3} \quad \dots \quad \sigma_j \rho_{\Pi j} \quad \dots \quad \sigma_N \rho_{\Pi N} \right\|$, $\rho_{\Pi j}$ – коэффициент ковариации флюктуационной составляющей ионосферной задержки между потребителем и j-й ККС.

На рис. 4, а представлены графики зависимости $\sigma_{\text{ост}}^{\text{норм}}$ от расстояния между потребителем и системой ККС при одинаковых расстояниях между ККС.

На рис. 4, б представлена та же зависимость, но рассматривается две опорные станции, расположенные на окружности некоторого радиуса. При этом исследуется зависимость $\sigma_{\text{ост}}^{\text{норм}}$ от геометрии построения системы. Расстояние между потребителем и каждой из станций неизменно, а изменяется расстояние между ККС.

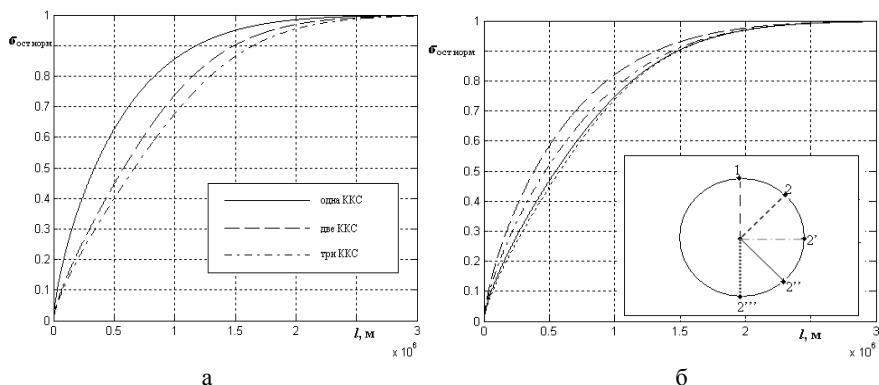


Рис. 4. Зависимость $\sigma_{\text{ост}}^{\text{норм}}$ от расстояния между потребителем и системой ККС

Выводы. Таким образом, ограничившись некоторым уровнем $\sigma_{\text{ост}}^{\text{норм}}$, можно определить достаточное количество каналов компенсации – ККС сети. Проведенный анализ корреляционных свойств флюктуационной

составляющей ионосферных задержек навигационного сигнала при GPS измерениях позволяет учитывать характер их изменения (пространственную и временную деградацию поправок АП от ККС) при разработке методов компенсации данной составляющей погрешности измерения в АП с использованием режима дифференциальной коррекции.

Предложенная модель пространственной и временной деградации дифференциальных поправок от ККС позволяет учитывать корректирующую информацию каждой корректирующей станции сети со своим “весом”, в зависимости от удаленности потребителя от данной станции.

ЛИТЕРАТУРА

1. Балов А.В. Концепция создания централизованной дифференциальной спутниковой системы местоопределения с расширенной зоной действия // *Радионавигация и связь*. № 2. Среднеорбитальные спутниковые радионавигационные системы. – М.: ИПЖР. – 2000. – Вып. IV. – С. 26 – 30.
2. Глобальная спутниковая радионавигационная система ГЛОНАСС / Под ред. В.Н. Харисова, А.И. Перова, В.А. Болдина. – М.: ИПЖР, 1998. – 400 с.
3. Деденок В.П., Флерко С.Н., Дейнеко В.Н. Метод адаптивной компенсации влияния ионосферы на спутниковые навигационные измерения в одночастотной аппаратуре потребителя // *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. – 2003. – № 5 (5). – С. 9 – 12.
4. Котяшкин С.И. Определение ионосферной задержки сигналов в одночастотной аппаратуре потребителя спутниковой системы навигации NAVSTAR // *Зарубежная радиоэлектроника*. – 1989. – № 5. – С. 85 – 95.
5. Кульнев В.В., Куликов В.Ю. Обработка информации от нескольких контрольно-корректирующих станций при реализации дифференциального режима в ГЛОНАСС и GPS // *Радионавигация и связь*. № 2. Среднеорбитальные спутниковые радионавигационные системы. – М.: ИПЖР. – 2000. – Вып. IV. – С. 56 – 63.
6. Ширман Я.Д., Манжос В.Н. Теория и техника обработки радиолокационной информации на фоне помех. – М.: Радио и связь, 1981. – 416 с.
7. Ярлыков М.С., Кудинов А.Т. Повышение качества функционирования спутниковых радионавигационных систем за счет информационной избыточности // *Радионавигация и связь*. № 2. Среднеорбитальные спутниковые радионавигационные системы. – М.: ИПЖР. – 2000. – Вып. IV. – С. 31 – 39.
8. Schaer S. How to use CODE's Global Ionosphere Maps // *IGS Position Paper. – IGS Analysis Centers Workshop, May 1997*. – 9 p. – [Электр. ресурс]. – Режим доступа: (<http://www.aiub.unibe.ch/ionosphere.html>).

Поступила 29.03.2005

Рецензент: доктор технических наук, профессор А.В. Кобзев,
Харьковский университет Воздушных Сил.