

УДК 621.396.98

Р.Э. Пашенко¹, Д.В. Карлов², К.К. Кулагин²¹Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба²Объединенный научно-исследовательский институт Вооруженных Сил, Харьков

АНАЛИЗ ПЕРЕМЕЩАЮЩИХСЯ ИОНОСФЕРНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ, ВЫЗЫВАЕМЫХ СТАРТОМ РАКЕТЫ-НОСИТЕЛЯ, С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПСЕВДОФАЗОВОЙ ПЛОСКОСТИ

Рассмотрена возможность использования псевдофазовой плоскости и фазовых портретов для анализа сигналов, принимаемых двухчастотными приемниками спутниковой радионавигационной системы ГЛОНАСС/GPS. Показано, что структура фазового портрета полного электронного содержания ионосферы изменяется при старте ракеты-носителя.

полное электронное содержание ионосферы, псевдофазовая плоскость, фазовый портрет

Введение

Постановка проблемы и анализ литературы.

В настоящее время в мире проведено большое количество теоретических и практических исследований в области мониторинга текущего состояния ионосферы. Исследования показывают, что запуск ракеты-носителя оказывает определенное воздействие на ионосферу. При этом могут изменяться ее химический состав и проявляться динамические, тепловые, электромагнитные эффекты воздействия. Данные зондирования показывают, что после запуска ракеты-носителя в течение примерно одного часа происходит частичная перестройка структуры ионосферы на расстояниях до 2000 км, которая проявляется в возникновении волновых возмущений ионосферы различного масштаба и регистрируемых при радиозондировании ионосферы в виде перемещающихся ионосферных возмущений (ПИВ) различного масштаба. ПИВ представляют собой неоднородности области F ионосферы с большими горизонтальными масштабами, чем другие неоднородности. Это волнообразные колебания изолиний электронной плотности, медленно движущихся вниз. Скорость движения ПИВ составляет от ~200 м/с до ~10 км/с [1].

Известно [2 – 4], что источниками ПИВ могут быть как антропогенные воздействия (запуски ракет, взрывы, ядерные испытания), так и естественные процессы различной природы (магнитные бури, погодные фронты, тропосферная турбулентность и струйные течения, солнечный терминатор, сильные землетрясения, извержения вулканов). Анализу структуры и характеристик ПИВ различной природы в ионосфере посвящено много работ [4 – 6].

Цель статьи: показать возможность использования псевдофазовой плоскости и фазовых портретов для обработки данных, полученных двухчастотными приемниками спутниковой радионавигацион-

ной системы ГЛОНАСС/GPS, при анализа ПИВ, возникающих после старта ракеты-носителя.

Подготовка исходных данных для анализа

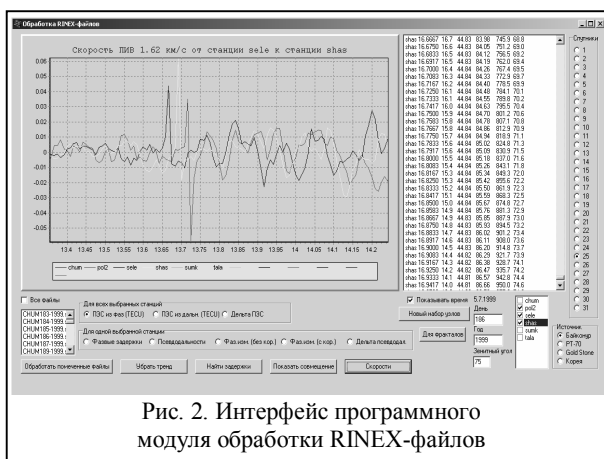
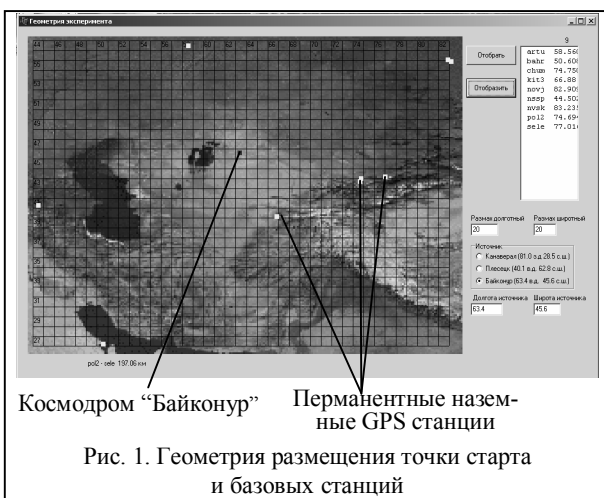
Для исследования возможности применения псевдофазовой плоскости и фазовых портретов при анализе ПИВ, возникающих в ионосфере после старта ракеты-носителя, воспользуемся данными запуска ракеты “Протон” 5 июля (186 день) 1999 года с космодрома “Байконур”, которые свободно размещены в сети Интернет.

В качестве исходных данных используются так называемые RINEX-файлы, получаемые сетью базовых станций системы GPS и свободно публикуемые в сети Интернет. Такие файлы генерируются программным обеспечением двухчастотных приемников базовых станций. В качестве базовых станций были выбраны перманентные наземные GPS станции POL2, SHAS и SELE. Данные в виде RINEX-файлов для этих станций брались за четыре дня 184, 185, 186, 187. Геометрия размещения точки старта и базовых станций показана на рис. 1.

Для предварительной подготовки исходных данных был создан программный модуль обработки RINEX-файлов. Программный модуль также может использоваться для расчета и визуализации некоторых параметров перемещения ПИВ на основе вычисления полного электронного содержания в ионосфере.

Входными данными для программного модуля являются RINEX-файлы, которые состоят из файла навигационных сообщений и файла наблюдений измерений перманентных наземных GPS станций в текстовом формате, а также межканальные аппаратные задержки для GPS станций и GPS спутников. Выходными данными, которые доступны пользователю и отображаются в окнах программы, являются:

условные названия GPS станций, номера GPS спутников, графики параметров ионосферы и данные о скорости перемещения ПИВ. Интерфейс программного модуля обработки RINEX-файлов представлен на рис. 2.



С помощью программного модуля обработки RINEX-файлов было рассчитано вертикальное полное электронное содержание (ВПЭС) в TECU ($1 \text{ TECU} = 10^{16} \text{ эл./м}^2$). Значения ВПЭС получается путем проецирования данных ПЭС по исходному направлению на вертикаль, проходящую через слой F2 ионосферы в точке его пересечения лучом в направлении спутник-приемник. Используя эти данные, проведем анализ перемещающихся ионосферных возмущений, вызываемых стартом ракеты-носителя, с использованием псевдофазовой плоскости и фазовых портретов.

Применение фазовых портретов для анализа полного электронного содержания ионосферы

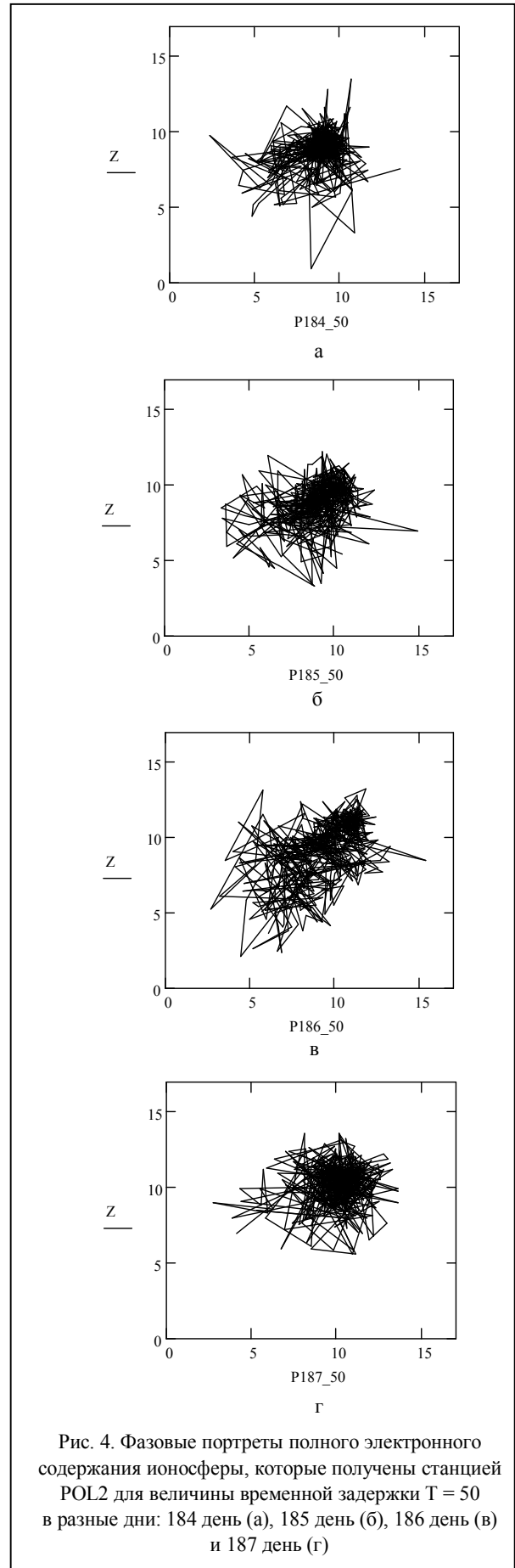
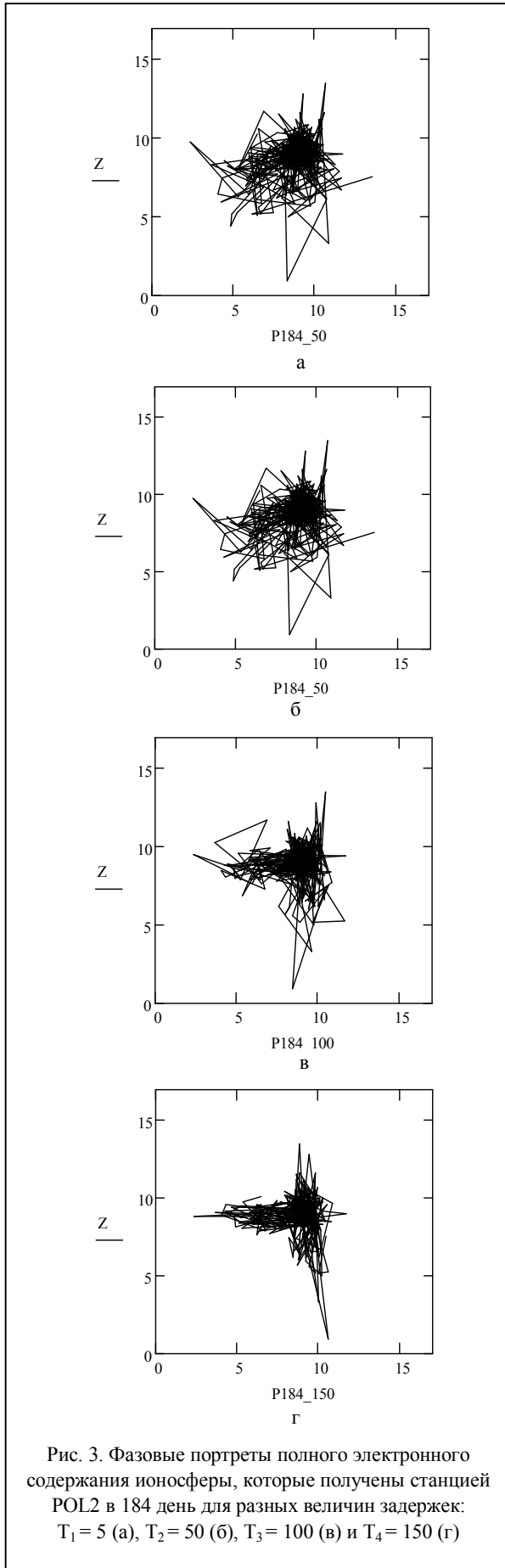
Для анализа данных, полученных при старте ракеты-носителя с помощью перманентных наземных GPS станций, используем один из методов нелинейной динамики – метод построения псевдофа-

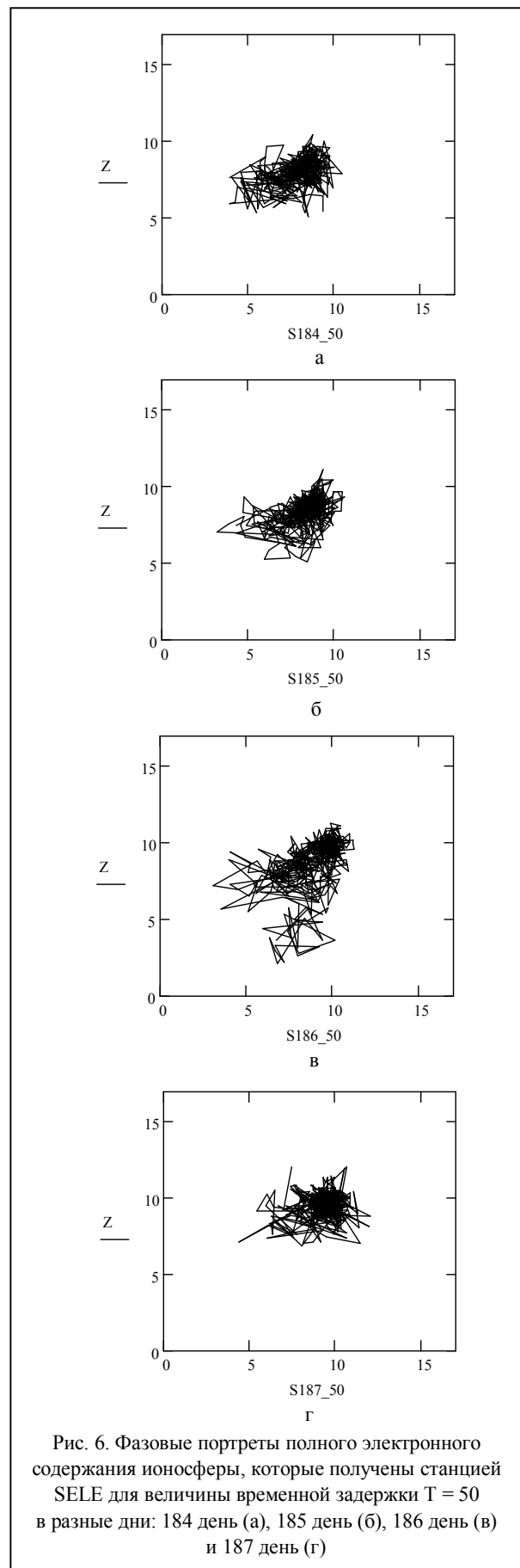
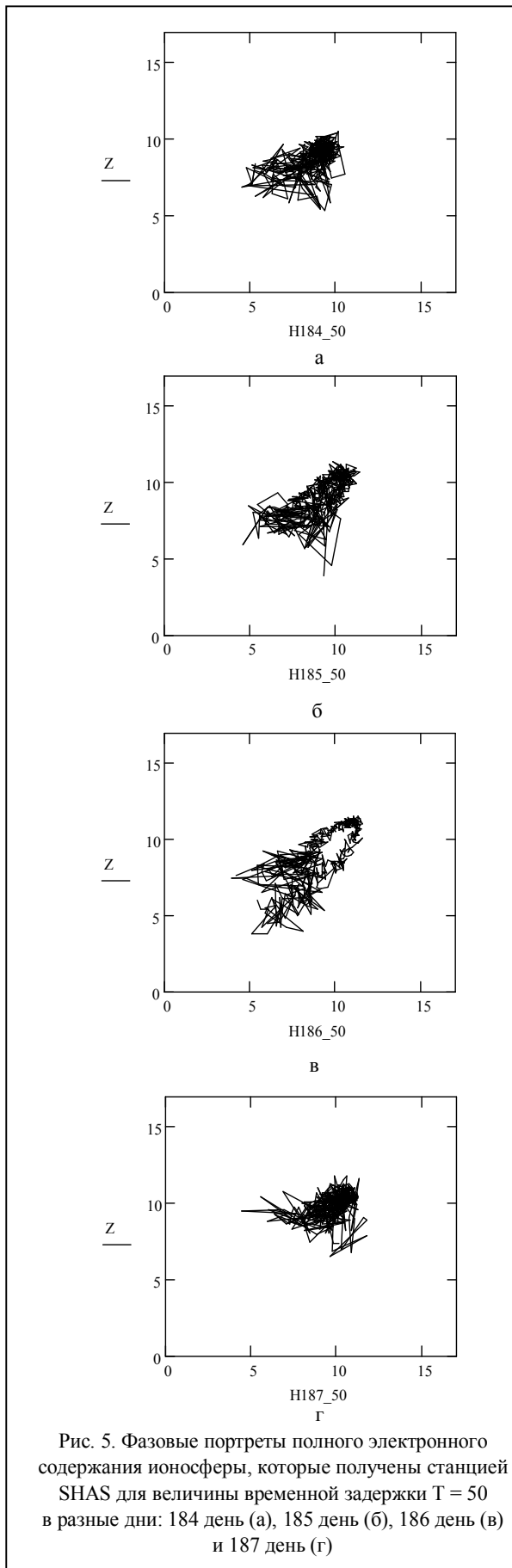
зовой плоскости и фазовых портретов, который описан в [7, 8]. Для этого построим фазовые портреты полного электронного содержания ионосферы в TECU, которые получены последовательно за четыре дня 184, 185, 186, 187 для трех разных станций POL2, SHAS и SELE. На рис. 3 показаны фазовые портреты полного электронного содержания ионосферы в TECU, которые получены станцией POL2 в 184 день наблюдений для различных временных задержек: $T_1 = 5$ (а), $T_2 = 50$ (б), $T_3 = 100$ (в) и $T_4 = 150$ (г).

На рис. 3 по оси абсцисс отложены значения полного электронного содержания ионосферы (Z_i), а по оси ординат – те же значения но сдвинутые на величину T (Z_{i+T}). Как видно из анализа рис. 3 с увеличением временной задержки T фазовые портреты полного электронного содержания ионосферы группируются возле определенной области псевдофазового пространства, а при $T = 150$ наблюдается формирование фазового портрета в виде "креста". Такая структура фазового портрета обусловлена тем, что данные представлены после аналого-цифрового преобразователя (АЦП) и обусловлена шумами АЦП. Кроме того, длина выходного временного ряда не большая и колеблется от $N = 563$ до $N = 578$ точек. Поэтому во время дальнейшего анализа полного электронного содержания ионосферы с помощью фазовых портретов будем использовать временную задержку $T = 50$. Характер поведения фазовой траектории в псевдофазовой плоскости показывает, что выходные данные на плоскости распределены хаотично. Это обусловлено хаотичностью электронного содержания ионосферы. Рассмотрим поведение фазовых портретов полного электронного содержания в разные дни наблюдения.

На рис. 4 – 6 показаны фазовые портреты полного электронного содержания ионосферы, которые получены при помощи данных от станций POL2 (рис. 4), SHAS (рис. 5) и SELE (рис. 6) в разные дни: 184 день (а), 185 день (б), 186 день (в) и 187 день (г). Как видно из анализа этих рисунков фазовые портреты полного электронного содержания ионосферы в 186 день наблюдения всех станций отличаются от фазовых портретов в другие дни. Эти фазовые портреты (186 день) характеризуются большим разбросом фазовых траекторий по сравнению с фазовыми портретами других дней. В эти дни (184, 185, 187 дни) фазовые траектории сгруппированы в соответствующей области псевдофазовой плоскости.

Изменение характера фазового портрета скорее всего обусловлено изменением электронного содержания ионосферы. Известно [2], что при запуске ракет надежно зарегистрированы возмущения в F-области. Более детальный анализ показывает, что в этой области ионосферы имеют место два типа возмущений.





Первый из них характеризуется существенным и продолжительным понижением полного электронного содержания ионосферы, главным образом, на высотах области F_2 , второй – возникновением волнообразных затухающих колебаний полного электронного содержания ионосферы.

Для количественной оценки изменения данных полного электронного содержания ионосферы проведем статистический анализ полученных фазовых портретов. В табл. 1 приведены данные о количестве выходных данных (точек), которые использовались во время оценки, математическое ожидание, дисперсия и среднее квадратическое отклонение для четырех дней наблюдения.

Таблица 1
Данные для четырех дней наблюдения

Станция	Вид характеристики	День наблюдения			
		184	185	186	187
POL2	Количество данных, N	576	577	577	573
	Математическое ожидание, m	8,587	8,736	9,046	9,933
	Дисперсия, σ^2	1,929	2,621	4,588	2,208
	Среднее квадратическое отклонение, σ	1,389	1,619	2,142	1,486
SHAS	Количество данных, N	576	576	572	566
	Математическое ожидание, m	8,595	8,974	8,896	9,786
	Дисперсия, σ^2	1,271	1,951	3,574	1,015
	Среднее квадратическое отклонение, σ	1,128	1,397	1,891	1,008
SELE	Количество данных, N	568	568	563	568
	Математическое ожидание, m	7,911	8,229	8,538	9,278
	Дисперсия, σ^2	1,111	1,19	2,88	0,95
	Среднее квадратическое отклонение, σ	1,054	1,091	1,697	0,975

Анализ данных в табл. 1 показывает, что в 186-й день наблюдения дисперсия и связанное с ней среднее квадратическое отклонение выходных данных полного электронного содержания ионосферы максимально по сравнению с другими днями для всех станций наблюдения (в таблице выделены максимальные значения). Такой зависимости для математического ожидания данных не наблюдается. Математическое ожидание данных позволяет оценить положение центра области группирования фазовых траекторий на псевдофазовой плоскости. Величина математического ожидания выходных данных увеличивается с каждым днем наблюдения, т.е. фазовый портрет смещается вправо вверх.

Выводы

1. Показана возможность использования псевдофазовой плоскости и фазовых портретов при об-

работке данных, полученных двухчастотными приемниками спутниковой радионавигационной системы ГЛОНАСС/GPS.

2. Построение фазовых портретов полного электронного содержания ионосферы и дальнейший анализ их форм позволил сделать вывод о том, что в 186-й день наблюдения были изменения в электронном содержании ионосферы, которые обусловлены запуском ракеты-носителя “Протон” с космодрома “Байконур”.

3. Оценка статистических характеристик (математическое ожидание, дисперсия и среднее квадратическое отклонение) выходных данных подтвердили полученный результат.

4. Максимальное значение дисперсии и среднее квадратическое отклонение выходных данных 186-го дня наблюдения по сравнению с другими днями характеризует степень разброса фазовых траекторий на псевдофазовой плоскости.

5. Математическое ожидание позволяет оценить положение центра области группирования фазовых траекторий на псевдофазовой плоскости.

Список литературы

1. Солнечная и солнечно – земная физика. Иллюстрированный словарь терминов / Под ред. А. Бруцека и Ш. Дюрана. – М.: Мир, 1980. – 254 с.
2. Нагорский П.М. Неоднородная структура области F ионосферы, образованная ракетам // Геомагнетизм и аэронавигация. – 1998. – Т. 38. – С. 100-106.
3. Хлыбов Е.С., Гаврилов Б.Г., Егоров Д.В. Исследование влияния сильных сейсмических событий на полное электронное содержание в ионосфере // Труды Международной Байкальской молодежной научной школы по фундаментальной физике. – 2006. – С. 177-180.
4. Перемещающееся ионосферное возмущение, возможно инициированное высотным взрывом / Э.Л. Афраймович, С.В. Воейков, О.С. Лесюта и др. // Солнечно-земная физика. – 2002. – Вып. 3. – С. 73-79.
5. Афраймович Э.Л., Астафьева Э.И. Морфология и динамика изолированных ионосферных неоднородностей по данным глобальной сети GP // Солнечно-земная физика. – 2003. – Вып. 3. – С. 50-60.
6. Афраймович Э.Л., Воейков С.В., Перевалова Н.П. Перемещающиеся волновые пакеты возмущений полного электронного содержания по данным глобальной сети GPS (морфология и динамика) // Солнечно-земная физика. – 2002. – Вып. 3. – С. 61- 72.
7. Малинецкий Г.Г., Потапов А.Б. Современные проблемы нелинейной динамики. – М.: Едиториал УРСС, 2002. – 360 с.
8. Пащенко Р.Э. Основы теории формирования фрактальных сигналов. – Х.: ХОО НЭО “Эко Перспектива”, 2005. – 296 с.

Поступила в редколлегию 27.02.2007

Рецензент: д-р техн. наук, проф. В.И. Карпенко, Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба, Харьков.