

Влияние климатических и геофизических явлений на помехоустойчивость приема радионавигационных сигналов систем ГЛОНАСС/GPS.

В. А. Иванов, Н. В. Рябова, А. В. Зуев, А. А. Кислицын, П. М. Ершов

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Марийский государственный технический университет», пл. Ленина, д. 3, г.Йошкар-Ола, Республика Марий Эл, 424000, krts@marstu.net.

Рассмотрены методики оценки и влияния климатических условий в приземном слое и эффектов космической погоды в верхней атмосфере Земли на помехоустойчивость навигационных сигналов ГЛОНАСС/GPS. Представлены результаты анализа экспериментов в зимний и осенний периоды. Разработан программный продукт, оценивающий результаты эксперимента.

The estimation methods of the influence of climatic conditions in the surface layer and cosmic weather effects in the Earth's upper atmosphere on signal-to-noise ratio of satellite navigation radio systems are considered. The results of the analysis of experiments in the winter and autumn periods. Developed software that assesses the results of the experiment.

Введение. Влияние внешней среды на результаты спутниковых измерений проявляется как через изменения времени прохождения радиосигналов от спутника до приемника, так и через возникновение многолучевости, обусловленной отражениями радиосигналов от тех или иных отражающих поверхностей, расположенных в непосредственной близости от приемника.

Космическая группировка навигационных систем излучает радиосигналы, которые на пути к приемнику, расположенному на Земле, проходят через земную атмосферу, включая ионосферу. Среди работ, посвященных этой тематике, можно отметить статьи К. М. Антоновича, А. Хансена, Д. Веллса, Б. Гофманна-Велленгофа, Г. Лихтенгера, Д. Коллинза, Т. Садовской и др. Известно [1–3], что на характеристики спутниковых сигналов заметное влияние оказывают климатические факторы (температура воздуха, уровень осадков, атмосферное давление) и состояние космической погоды (уровень солнечной и магнитной активности).

Цель работы – создание алгоритмов и аппаратуры для исследования влияния метеорологических условий и космической погоды на помехоустойчивость приема радионавигационных сигналов систем ГЛОНАСС и GPS; получение на этой основе новых экспериментальных данных.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие **задачи**:

- разработать алгоритм получения данных о влиянии метеоусловий и геофизических явлений на помехоустойчивость радионавигационных сигналов и создать аппаратно-программный комплекс;
- провести измерения отношения S/N радионавигационных сигналов при различных климатических условиях и для различных геофизических явлений;
- осуществить интерпретацию экспериментальных данных.

1. Техника эксперимента. Комплекс базируется в г. Йошкар-Оле в Марийском государственном техническом университете. Блок-схема созданного аппаратно-программного комплекса представлена на рис.1.

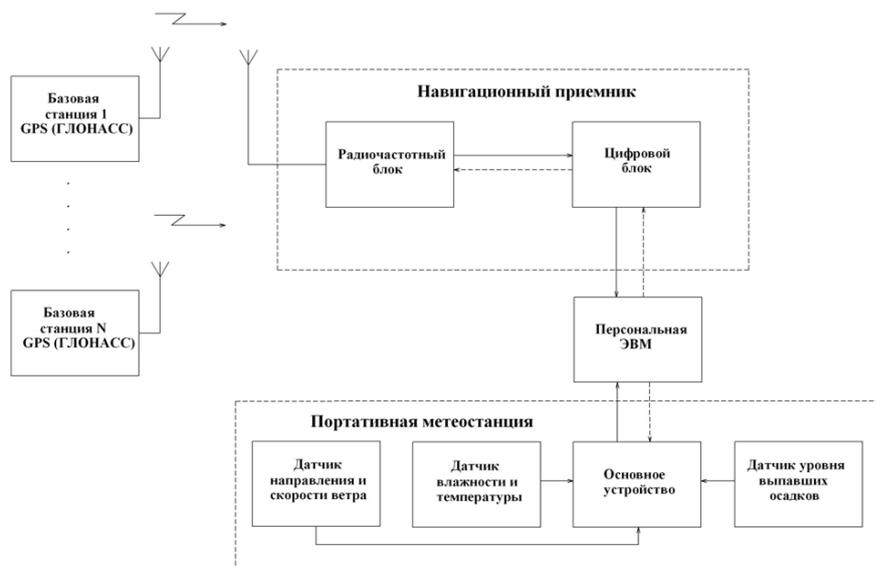


Рис. 1. Аппаратно-программный комплекс

Он включает в себя специализированный навигационный приемник NovAtel FlexPak-V2 с антенной NovAtel GPS-702GG, портативную метеостанцию Oregon WMR200 и персональный компьютер. Основные характеристики навигационного приемника приводятся в работе [4]. Данный приемник позволяет с достаточно высокой точностью производить измерения S/N навигационных сигналов с частотами L1(1575,42 МГц) и L2 (1227,60 МГц). Частота вывода данных составляет 20 Гц. Это дает возможность анализировать данные с высоким временным разрешением. Прием сигналов от спутников осуществляется с достаточно полным обзором неба. Антенна GPS-702GG, обладающая технологией Pinwheel, позволяет снизить негативное влияние на результаты измерений многолучевости. Метеостанция Oregon WMR200 позволяет определять основные погодные показатели (температуру и влажность воздуха, атмосферное давление, количество выпавших осадков). Сведения метеоданных записываются на персональный компьютер в файл с расширением .txt, которые в дальнейшем конвертируются и обрабатываются программным продуктом. Сигнал, принимаемый антенной, поступает на вход приемника. Далее он трансформируется по частоте, фильтруется. Сигнал промежуточной частоты преобразуется в цифровой вид и обрабатывается персональным компьютером. Основной программой для работы с навигационным приемником служит NovAtel CDU. Она осуществляет настройку приемной станции, управление и сбор навигационных данных. Первичная информация отображается на компьютере в виде log-файла (расширение .gps). С помощью специально разработанного программного продукта Converter данные извлекаются, обрабатываются, результаты конвертируются в файл формата Excel. Данные сортируются по спутникам. Для дальнейшей обработки отбираются данные тех спутников, которые находятся в пределах заданного сектора углов возвышения. Полученные выборки сохраняются в отдельном файле с расширением .txt (исходные данные).

С помощью разработанной программы вторичной обработки (среда Mathcad) для выбранного спутника рассчитываются значения S/N .

Данные о состоянии солнечной активности и магнитного поля Земли брались с сайта Физического института Российской академии наук [5].

2. Методика проведения эксперимента и объем полученных данных. Эксперименты проводились зимой и осенью 2011 года. Период непрерывных наблюдений составлял около 80 суток.

Влияния температуры воздуха в приземном слое на помехоустойчивость навигационного сигнала исследовались для моментов с одинаковыми значениями давления, геофизических явлений, осадки отсутствовали. На интервале наблюдения это составило четыре дня 3, 14, 22 и 26 февраля (для зимы) и три дня 24, 26 сентября и 4 октября (для осени).

При исследованиях влияния осадков в виде дождя и снега на помехоустойчивость радионавигационных сигналов использовалась классификация осадков, представленная в табл. 1. В осенних экспериментах (октябрь 2011 г.) влияние оказывали осадки в виде дождя. Их интенсивность составляла 3,3 мм/ч, т.е. они были умеренными. Влияние осадков в виде снега исследовалось 2 и 7 февраля (шел сухой снег) 2011 года. В процессе этих наблюдений температура воздуха и давление практически не менялись. При исследовании влияния условий космической погоды на помехоустойчивость радионавигационных сигналов выбирались дни с одинаковыми климатическими условиями (температура, влажность воздуха, давление, наличие осадков), а также с одинаковым временным интервалом, с одинаковым азимутом спутников и углом возвышения, но с различными уровнями геофизической возмущенности.

Таблица 1. Классификация осадков

Интенсивность	Морось	Дождь	Снег
Слабая	< 0,1 мм/ч	< 2,5 мм/ч	< 1,0 мм/ч
Умеренная	0,1 и < 0,5 мм/ч	2,5 и < 10 мм/ч	1,0 и < 5 мм/ч
Сильная	0,5 мм/ч	10 мм/ч	5 мм/ч

3. Результаты и интерпретация данных влияния на S/N климатических условий. Известно [6], что сигналы данного частотного диапазона при распространении в атмосфере Земли ослабляются из-за потери части электромагнитной энергии, а отношение S/N уменьшается. Поглощение зависит от длины волны, температуры, влажности, атмосферного давления и параметров рассеивающих частиц и профиля электронной концентрации.

Влияние температуры. В табл. 2 приведено сравнение результатов суточных вариаций ослабления радионавигационных сигналов для систем GPS и ГЛОНАСС при изменении температуры в зимний и осенний периоды.

Таблица 2. Результаты ослабления радионавигационных сигналов

№ спутника	Частота	Понижение температуры, °С	Улучшение качества сигнала, дБ	
			Зима	Осень
21 (GPS)	L1	5	0,29	0,05
		10	0,38	0,12
		15	0,53	0,15
	L2	5	0,4	0,07
		10	0,47	0,15
		15	0,7	0,3
45 (ГЛОНАСС)	L1	5	0,16	0,13
		10	0,33	0,17
		15	0,39	0,2
	L2	5	0,06	0,21
		10	0,31	0,3

		15	0,34	0,5
--	--	----	------	-----

Оценивая полученные результаты, установили: понижение температуры в зимний и осенний периоды увеличивает отношение S/N , причем уменьшение температуры на 15 °С в зимний период приводит к увеличению помехоустойчивости спутникового сигнала системы ГЛОНАСС в среднем на 0,37 дБ для частоты L1 и на 0,44 дБ для частоты L2; а для системы GPS на 0,57 и 0,7 дБ соответственно. Изменение температуры на 10 °С в

осенний период приводит к увеличению помехоустойчивости спутникового сигнала системы ГЛОНАСС в среднем на 0,2 дБ для частоты L1 и на 0,5 дБ для частоты L2, для системы GPS на 0,15 и 0,3 дБ соответственно. Это может быть связано с тем, что из-за понижения температуры уменьшается количество и интенсивность естественных шумов, а соответственно и уровень помех.

Влияние количества осадков на помехоустойчивость радионавигационных сигналов. Исследования, например [7], показали, что степень ослабления радиоволн в осадках зависит от их водности, размеров капель. Наименьшее ослабление наблюдается в тумане, наибольшее в дожде. Сигналы, отраженные от снега, зависят от интенсивности снега (водности), размеров снежинок и главным образом от наличия на них слоя воды (смачивания). Сухой же снег имеет электрическую проницаемость в десятки раз меньшую, чем вода, вследствие чего он слабо отражает радиоволны.

В табл. 3 приведены результаты ослабления радионавигационных сигналов в условиях дождя и снега.

Таблица 3. Результаты ослабления радионавигационных сигналов при наличии осадков

Дождь					
№ спутника	Частота	Наличие осадков	Среднее значение S/N , дБ	Доверительный интервал	Ослабление сигнала, дБ
2 (GPS)	L1	да	38	38,99< S/N <39,74	9
		нет	48,25	49,15< S/N <49,3	
	L2	да	30	29,93< S/N <30,97	8,5
		нет	40,71	41,4< S/N <41,81	
Снег					
№ спутника	Частота	Наличие осадков	Среднее значение S/N , дБ	Доверительный интервал	Ослабление сигнала, дБ
7 (GPS)	L1	да	49,86	49,84< S/N <49,91	0,1
		нет	49,96	49,93< S/N <50,01	
	L2	да	47,67	47,66< S/N <47,71	0,09
		нет	47,76	47,7< S/N <47,84	

Экспериментально установлено, что при наличии осадков отношение S/N падает. Этот эффект можно объяснить тем, что осадки (дождь, туман, снег) ослабляют сигнал. Чем интенсивней осадки, тем больше ослабление сигнала. Также заметно, что при дожде сигнал ослабевает больше, чем во время снега. Возможно, здесь играет роль линейная поляризация (горизонтальная или вертикальная). Капля воды как оптическая линза отклоняет или вращает вектор поляризации. Для системы ГЛОНАСС сигнал во время дождя ослабевает в среднем на 7,3 дБ, а для GPS – на 7 дБ.

4. Результаты влияния на S/N геофизических условий. Возрастание солнечной активности приводит ко многим эффектам, поэтому ионосферное распространение может испытывать различные кратковременные возмущения. Эти возмущения нарушают регулярную электронную конфигурацию ионосферы и вызывают ухудшение

условий распространения радиоволн. Солнечные рентгеновские вспышки, прежде всего, оказывают влияние на сигналы, трасса которых пролегает по дневной стороне. Однако в некоторых обстоятельствах высокая солнечная активность может улучшить связь. Как правило, чем выше солнечная активность, тем лучше условия распространения высокочастотных сигналов (выше 14 МГц) [8].

В результате проведения экспериментов получены зависимости значений S/N от времени при сильных солнечных вспышках и в контрольные дни (отсутствие вспышек на Солнце) для спутников ГЛОНАСС и GPS. Установлено, что с ростом солнечной активности отношение S/N в среднем увеличивается на 6,5 дБ. Полученные экспериментальные данные согласуются с независимыми результатами других авторов. Установленные результаты можно объяснить тем, что при большей интенсивности излучения ионизация слоев сильнее, а следовательно, более благоприятные условия для распространения радиоволн на высоких частотах.

Магнитные бури происходят, когда заряженные частицы высоких энергий от солнечных вспышек, эруптивных протуберанцев или коронарных дыр достигают Земли, вызывая возмущения в магнитном поле. Сильные электрические поля, которые возникают при этом, вызывают значительные изменения в морфологии ионосферы, что приводит к большим колебаниям в задержках распространения в псевдодальностях и опережениях в фазах несущих. Происходит затухание сигнала [9]. Экспериментально полученные зависимости значений S/N от времени для периодов с высокой активностью магнитного поля, когда $K_p > 5$, и низкой ($K_p < 5$) для спутников систем ГЛОНАСС/GPS показали, что во время магнитных бурь отношение S/N падает в среднем на 4 дБ. Это можно объяснить флуктуационными процессами, вызванными образованием, перемещением и исчезновением локальных неоднородностей в ионосфере.

Выводы. Создан аппаратно-программный комплекс для проведения экспериментальных исследований влияния метеоусловий и космической погоды на помехоустойчивость радионавигационных сигналов глобальных систем ГЛОНАСС/GPS. Установлено, что на помехоустойчивость приема радионавигационного сигнала оказывают существенное влияние уровень осадков и температура воздуха в приземном слое. Показано, что при понижении температуры в зимний период для системы ГЛОНАСС отношение S/N увеличивается в среднем на 0,4 дБ, а для системы GPS – на 0,6 дБ. Понижение температуры в осенний период приводит к увеличению помехоустойчивости спутникового сигнала системы ГЛОНАСС в среднем на 0,35 дБ, для системы GPS – на 0,25 дБ. Установлено, что для системы GPS во время дождя происходит ослабление сигнала на 7 дБ, для системы ГЛОНАСС – 7,5 дБ.

С ростом солнечной активности отношение S/N увеличивается в среднем на 6,5 дБ. Во время магнитных бурь отношение S/N падает в среднем на 4 дБ.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ: проекты № 10-02-00620; 10-07-00466-а; 11-07-00420-а; ФЦП: ГК № 14.740.11.1147, № 14.740.11.1209; №14.740.11.1436; АВЦП: № 8.2523.2011, № 8.2448.2011, № 8.2559.2011.

Литература

1. Антонович, К.М. Совместное использование метеоданных наземных и аэрологических наблюдений при обработке спутниковых измерений / К.М. Антонович, Е.К. Фролова // Вестник СГГА. – 2003. – Вып. 8. – С. 8-13.
2. Афраймович, Э.Л. GPS-мониторинг верхней атмосферы Земли / Э. Л. Афраймович, Н. П. Перевалова. – Иркутск: ГУ НЦ РВХ ВСНЦ СО РАМН, 2006. – 480 с.

3. *Hofmann-Wellenhof, B.* Global Positioning System. Theory and practice. –Fifth, revised edition / В. Hofmann-Wellenhof, Н. Lichtenegger, J.Collins. – Wienn, New-York: Springer, 2001. – 384 p.
4. *Иванов, В. А.* Влияние геомагнитных возмущений на полное электронное содержание ионосферы / В.А. Иванов, А.Ю. Желонкин, Н.В. Рябова, А.В. Зуев // Вестник МарГТУ. Сер.: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. – 2011. – №1. – С. 24-30.
5. Лаборатория рентгеновской астрономии Солнца Физического института Российской академии наук [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.thesis.lebedev.ru> (дата обращения: 23.02.2011).
6. Основы радиолокации [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://library.tuit.uz/lectures/TPS/osnovi_radiolokacii.htm (дата обращения: 14.05.2011).
7. Рефракция электромагнитных волн в тропосфере [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://moryak.biz/modules.php?name=Content&pa=showpage&pid=366> (дата обращения: 14.05.2011).
8. *Karl, T.* Солнечный ветер и магнитосфера Земли / Т. Karl, Ir.Thurber: перевод с англ. – Радиолобитель. – 2011. – № 4. – С. 6-8.
9. *Антонович, К. М.* Использование спутниковых навигационных систем в геодезии. В 2 т. Монография / Г.М. Антонович; ГОУ ВПО «Сибирская государственная геодезическая академия». – М.: ФГУП «Картгеоцентр», 2005. – Т. 1. – 334 с.