

П. КОВАРЖ

GPS-ПРИЕМНИК ДЛЯ МАЛЫХ СПУТНИКОВ piNAV L1

Приемник piNAV L1 – это GPS-приемник диапазона L1 для определения местоположения малых спутников на низких околоземных орбитах. Приемник прошел испытания с помощью программного эмулятора GPS ReGen при статических и динамических сценариях. Типичная горизонтальная ошибка местоположения при статическом сценарии составила 2,5 м (95%). При динамических сценариях ошибки местоположения возрастают по причине значительных ускорений низкоорбитального спутника относительно навигационных спутников.

Ключевые слова: космическая навигация, низкоорбитальный спутник, GPS, испытания приемника.

Введение

Малые спутники (микро-, нано-, пико- и фемтоспутники) – это бюджетные космические аппараты для астрономических исследований, технологических испытаний, дистанционного зондирования, образовательных проектов. Для большинства космических экспериментов требуется знание точного местоположения. GPS и другие глобальные навигационные спутниковые системы (ГНСС) предоставляют возможность определения координат и времени не только на Земле, но и в околоземном пространстве [1–5].

Использование стандартных ГНСС-приемников для навигации малых спутников затрудняется в связи с существующими для них ограничениями по скорости и высоте, недостаточным диапазоном доплеровского сдвига при поиске сигналов ГНСС и низкой радиационной стойкостью.

Характеристики сигнала и условия работы GPS-приемника в космосе были проанализированы много лет назад [1, 6], и в настоящее время они хорошо известны. Основные проблемы работы GPS-приемника на околоземной орбите вызваны большим доплеровским сдвигом полученного сигнала вследствие интенсивной динамики спутников GPS относительно спутника-потребителя, что затрудняет захват сигналов в приемнике. Очевидно, что в некоторых приемниках используется классический метод обнаружения сигнала путем последовательного поиска [6, 16]. Методы обнаружения сигналов в космических GPS-приемниках проанализированы в работах [13, 14]. Подробное исследование автономной работы простого GPS-приемника на низкой околоземной орбите представлено в [12]. Работа такого простого GPS-приемника с последовательным методом обнаружения сигнала возможна, но типичное время холодного запуска (при отсутствии априорных данных об эфемеридах спутников GPS, времени и положении потребителя) для приемника с 15 корреляторами составит 300 с.

Коварж Павел. Доктор наук, профессор Чешского технического университета в Праге (Чехия).

Научный редактор перевода д.т.н. Д. А. Кошаев

На рынке представлено множество GPS и многосистемных ГНСС-приемников [16–18] для применения в условиях космического пространства, но большинство из них не подходят для миссий с пико- и фемтоспутниками в силу большого размера, веса и энергопотребления. Цена таких приемников также не соответствует бюджету малозатратной спутниковой миссии.

Проект piNAV

В статье представлена архитектура и результаты функциональных испытаний GPS-приемника piNAV L1 [8], специально разработанного для бюджетных пико- и фемтоспутников.

Проект piNAV был начат в 2013 г., в его задачи входила разработка сверхмалого GPS-приемника для студенческого проекта CubeSat. В первой модели приемника использовалась максимально простая аппаратура, позволяющая реализовывать последовательный метод захвата сигналов.

На втором этапе проекта, начавшемся в 2015 г., в приемник был внедрен специализированный для космических условий блок захвата сигнала, который значительно ускоряет холодный запуск. Архитектура второй модели приемника и параметры его работы представлены в данной статье.

В настоящее время ведутся работы над третьей моделью приемника, в которой будут совмещаться усовершенствованные навигационные функции, например работа камеры и связанного передатчика, точное определение взаимного положения группировки спутников, а также дальнейшее снижение энергопотребления, повышение чувствительности и сокращение времени холодного запуска. Это расширит возможности применения приемника в будущих космических миссиях.

Требования

К навигационным ГНСС-приемникам для малых спутников предъявляются совсем другие требования, чем к стандартным навигационным приемникам для мобильного пользователя.

Требования к стандартному ГНСС-приемнику:

- Высокая точность определения местоположения и времени. Приемник должен реализовывать высокоточные модели исключения эффекта распространения сигнала через ионосферу и тропосферу.
- Исключительно высокая чувствительность, которая позволяет приемнику работать в городских каньонах, среди деревьев, в помещении и т.д. Более того, приемник должен работать с миниатюрной антенной, типичной для мобильных устройств, что дает снижение мощности сигнала до 20 дБ в сравнении со стандартной ГНСС-антенной.
- Исключительно быстрый запуск приемника (но он может осуществляться с помощью мобильной сети).
- Низкая чувствительность при многолучевости и распространении навигационных сигналов вне линии визирования.
- Низкое энергопотребление, возможность питания от батарей и продолжительное время работы от батарей.
- Малый размер и низкий вес.
- Очень большой рынок (много миллионов приборов в год), но приемник должен быть очень дешевым. Для производства приемников подходит технология ASIC (специализированные интегральные схемы).

К приемнику для малых низкоорбитальных спутников предъявляются совсем другие требования:

- Приемник должен работать на низкой околоземной орбите над тропосферой, внутри или выше ионосферы. Стандартные для наземного потребителя модели ионосферной задержки сигналов оказываются неэффективными на такой высоте.
- Приемник должен работать на спутниках со скоростью перемещения до 8 км/с. Алгоритмы захвата сигнала должны обеспечивать достаточный диапазон поиска доплеровской частоты.
- Достаточная чувствительность для работы в космосе, где кроме Земли отсутствуют естественные причины затенения навигационных спутников.
- Сохранение работоспособности в экстремальной ситуации, когда спутник вращается (нестабилизованный спутник или спутник с нарушениями в определении ориентации или ее управлении).
- Низкое энергопотребление. Приемник может потребить только небольшую долю энергии, имеющейся на спутнике.
- Спутник должен работать в условиях повышенного радиационного излучения. Радиационная стойкость должна соответствовать требованиям миссии.
- Размер и вес приемника должны позволять установить его на малый спутник.
- Средняя цена, соответствующая коммерческой практике.
- Рынок таких приемников очень мал, технология ASIC совершенно неприменима вследствие высокой технологической стоимости производства. В приемнике должна использоваться более малозатратная технология, даже при более высоком энергопотреблении и более высокой цене за единицу продукции. Подходящей технологией может быть, например, программное радио.

Архитектура приемника

На первом этапе разработки навигационного приемника для малых спутников были определены следующие критические проблемы, требующие решения:

1. Рынок навигационных приемников для малых спутников очень узок, поэтому приемник должен быть построен по технологии программного радио, выгодной для мелкосерийного производства.
2. Низкое энергопотребление, что сложно обеспечить при использовании технологии программного радио. Приемник должен быть максимально простым, но его простота не должна ухудшать функциональные параметры: точность, возможность работы на низкой орбите и надежность.
3. Холодный запуск приемника затруднен вследствие того, что область поиска доплеровской частоты в пять раз больше в сравнении со стандартным ГНСС-приемником из-за высокой скорости низкоорбитального спутника. Способна ли простая аппаратура приемника, построенная на программном радио, которое поддерживает алгоритм последовательного поиска, обеспечить работу на низкой околоземной орбите?

Ответы на эти вопросы были исследованы в ходе предварительного анализа [10]. Анализ дал четкий ответ, что стандартный алгоритм последовательного поиска, реализованный в простой аппаратуре, способен надежно работать на низкой околоземной орбите. Мы также доказали, что время холодного запуска зависит от количества каналов: чем больше каналов, тем меньше время запуска.

Мы также нашли оптимальный диапазон поиска частоты. GPS-приемник на низкой околоземной орбите работает надежно, но время до первого определения местоположения после включения (холодный запуск) может составлять около 600 с.

Блок-схема построенного приемника показана на рис. 1. В состав приемника входит радиочастотный блок (front end), который понижает частоту исходных сигналов GPS L1 до промежуточной частоты. Сигналы на промежуточной частоте обрабатываются в сигнальном процессоре на основе программируемой пользователем вентильной матрицы (ППВМ). Контроль коррелятора, управление приемником, оценку положения, скорости и времени осуществляет микроконтроллер (МК).

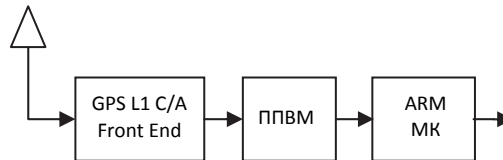


Рис. 1. Блок-схема приемника

Из компонентов приемника самое высокое энергопотребление имеет ППВМ. Коммерческие ППВМ очень чувствительны к радиационному излучению. Выбор ППВМ был очень важен. Мы выбрали миниатюрную ППВМ, на которой можно интегрировать 15 GPS L1 корреляторов, специально разработанных для этого приемника.

Блок захвата сигналов

Самой большой проблемой в первой модели приемника *piNAV* был длительный холодный запуск, типовая продолжительность которого на низкой орбите составляла около 300 с. Для ускорения холодного запуска и сокращения энергопотребления при запуске мы реализовали специализированный блок захвата сигналов. Чтобы не повышать энергопотребление приемника за счет блока захвата, мы не увеличивали ППВМ, а применяли ее оперативную реконфигурацию. После перезапуска приемника мы загружаем блок захвата в ППВМ. Он сканирует всю область поиска псевдослучайных кодов (ПСК) GPS. После этого проводится реконфигурация ППВМ с загрузкой в нее стандартных корреляторов GPS L1.

В блоке захвата используется алгоритм параллельного поиска в частотной области (рис. 2) [14, 19]. Реализация этого алгоритма в ППВМ относительно проста и занимает небольшую часть ресурсов ППВМ. В алгоритме используется модель сигнала во временной области, в то время как параллельный поиск фазы кода [14, 19] выполняется на основе преобразования Фурье. Преимущества параллельного алгоритма поиска в частотной области доказаны для широкого диапазона доплеровской частоты, в то время как эффективность этого алгоритма в стандартных мобильных приложениях, где диапазон поиска гораздо уже, крайне мала.

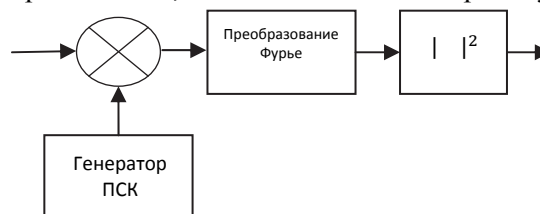


Рис. 2. Алгоритм параллельного поиска сигналов в частотной области

Блок захвата второй модели приемника piNAV исследует частотный диапазон ± 32 кГц для параллельного поиска всех 32 ПСК GPS и трех кодовых задержек. Определение кодовых задержек выполняется последовательно. Вся область поиска сканируется за 20 с.

Разработанный блок захвата сокращает время холодного запуска до 65 с и снижает энергопотребление при первом определении положения с 36 Дж до менее чем 8 Дж. Такое значительное снижение энергопотребления позволяет использовать приемник даже для фемтоспутников с низкими энергетическими запасами.

Механическая конструкция

Приемник piNAV L1 в настоящее время изготавливается в различных форм-факторах: piNAV (рис. 3), CubeSat (для легких наноспутников или тяжелых пикоспутников), PocketCube (для легких пикоспутников). Приемник также выпускается в виде заранее запрограммированных микросхем для применения на фемтоспутниках.



Рис. 3. Форм-фактор piNAV

Испытания

Приемник прошел ряд испытаний для оценки энергопотребления, диапазона рабочих температур, возможности работы в вакууме, радиационной стойкости, функциональных испытаний и т.д. В данной статье описываются наиболее важные функциональные испытания.

Функциональные испытания

Задача данного испытания состоит в оценке функциональности приемника и характеристик работы в космосе. Испытания проводились с помощью GPS-эмулятора ReGen [8]. Испытательная установка показана на рис. 4. Сигналы для выбранного сценария генерируются ПО ReGen и поступают на приемник, где они обрабатываются по технологии программного радио. Данные о местоположении, полученные от приемника, сохраняются на компьютере и анализируются в Matlab.



Рис. 4. Испытательная установка piNAV (форм-фактор PocketCube)

Для испытаний приемника было разработано четыре сценария (рис. 5):

- статический сценарий (виртуальная точка с долготой $14^{\circ}00'00.0''$ Е, широтой $50^{\circ}00'00.0''$ N и высотой 200 м в системе координат WGS 84);
- движение по идеализированной экваториальной круговой орбите эллипсоида WGS 86 на высоте 200 км с угловой скоростью 1,1023 рад/с (линейная скорость ~ 7.26 км/с);
- движение вокруг первого меридиана эллипсоида WGS 84 на высоте 200 км с угловой скоростью 1,1023 рад/с (линейная скорость $\sim 7,26$ км/с);
- движение по моделированной орбите МКС (рис. 6).

Задержки сигналов при прохождении ионосферы и тропосферы не учитывались.

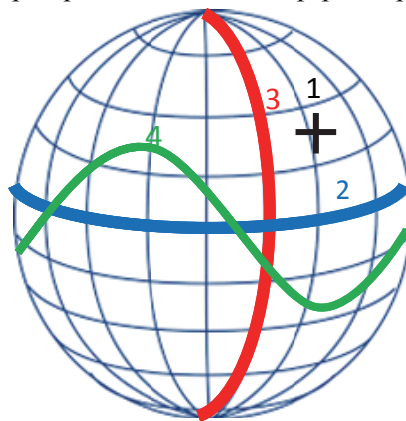


Рис. 5. Сценарии испытаний: 1 – Статический сценарий; 2 – Экваториальная орбита; 3 – Орбита первого меридиана; 4 – Моделированная орбита МКС

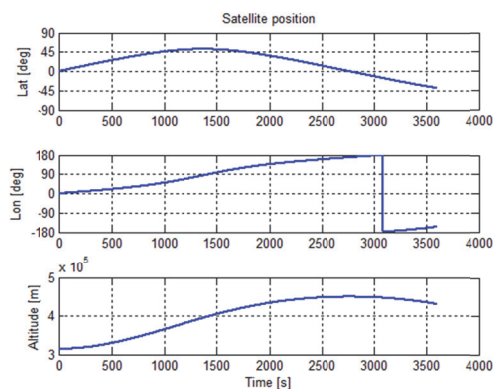


Рис. 6. Орбита МКС

Результаты испытаний

Типовые результаты работы приемника в статическом сценарии показаны на рис. 7–9. Среднее и среднеквадратические значения ошибок приемника riNAV L1 приведены в табл. 1.

Типичные ошибки приемника на моделированной орбите МКС приведены на рис. 10. Результаты испытаний по другим сценариям даны в таблице.

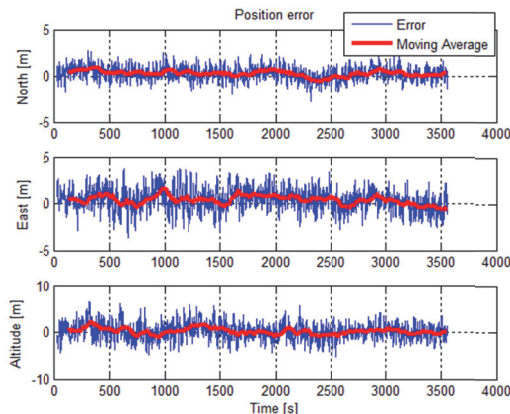


Рис. 7. Типичные ошибки положения при статическом сценарии

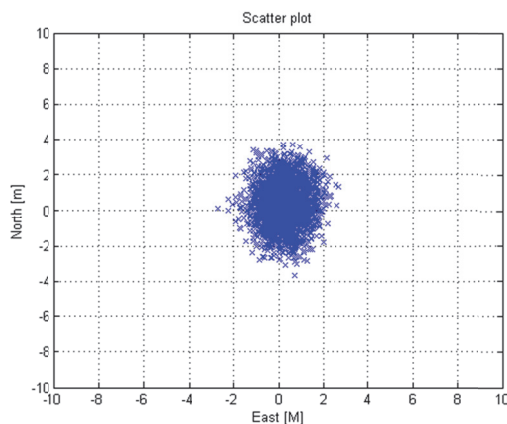


Рис. 8. Типичный график ошибок плановых координат при статическом сценарии

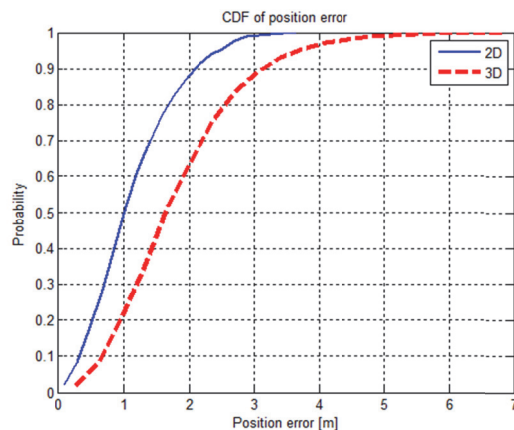


Рис. 9. Функция распределения ошибок координат в горизонтальной плоскости (2D) и в трехмерном пространстве (3D) при статическом сценарии

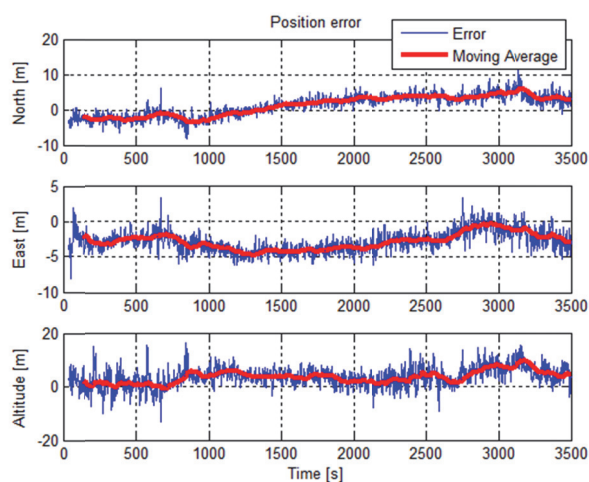


Рис. 10. Типичные ошибки положения при сценарии с орбитой МКС

В статическом сценарии ошибки положения имеют шумоподобный характер (рис. 7). Их осредненные на скользящем интервале значения пренебрежимо малы. С другой стороны, при динамическом сценарии – движении по орбите МКС – наблюдаются значительные медленноменяющиеся ошибки положения, которые на рис. 10 проявляются в виде существенного по уровню скользящего среднего. Отметим, что для слежения за сигналами GPS в приемнике piNAV L1 используются контуры автоподстройки по задержке второго порядка, которые чувствительны к взаимному ускорению GPS-спутников и спутника-потребителя. По этой причине на низкоорбитальном спутнике появляются медленноменяющиеся составляющие ошибок псевдодальностей, пропорциональных величине ускорения и обратно пропорциональных ширине полосы шума контуров автоподстройки по задержке.

С другой стороны, шум слежения (тепловой шум) пропорционален ширине полосы шума контуров автоподстройки по задержке. При конструировании контура необходимо найти компромисс между двумя этими ошибками. Таким образом, ширина полосы шумов приемника piNAV L1 была задана таким значением, чтобы ошибка слежения за псевдодальностью, вызванная максимальным взаимным ускорением GPS и низкоорбитальных спутников, не превышала 2 м.

Очевидно, что взаимное ускорение значительно меньше при статическом сценарии, так как динамика навигационных спутников, находящихся на средне-высотной орбите, гораздо ниже, чем у низкоорбитальных спутников.

Т а б л и ц а

Типичные погрешности приемника piNAV

Тип ошибки	Сценарий							
	Статический		Полярная орбита		Первый меридиан		Орбита МКС	
	Среднее [м]	СКО [м]	Среднее [м]	СКО [м]	Среднее [м]	СКО [м]	Среднее [м]	СКО [м]
По сев. оси	0,40	1,11	-0,62	1,20	-0,65	1,58	1,25	2,98
По вост. оси	0,26	0,70	0,11	1,12	0,18	1,50	-2,87	1,43
По высоте	0,21	1,71	3,57	2,52	3,61	3,36	3,56	3,59

Результаты радиационных испытаний

Радиационные испытания были проведены в лаборатории Института ядерной физики Чешской академии наук. Испытывалось четыре приемника. Три из них были оборудованы алюминиевыми крышками толщиной 2 мм, у четвертого крышки не было. Приемники испытывались в работающем состоянии. Приемники с крышками демонстрировали повреждения при получении дозы излучения 12-14 крад, а без крышки – при облучении 10,5 крад. Из компонентов приемника самое большое значение имела ППВМ. Отметим, что суммарная доза облучения на низкой околоземной орбите составляет $1 \div 10$ крад/год.

Выводы

Испытания приемника piNAV L1 подтвердили технические характеристики, данные в спецификации [6]. Типичные точностные характеристики приемника оказались более оптимистичными. Приемник полностью соответствует требованиям по определению местоположения малого низкоорбитального спутника. Приемник имеет низкое энергопотребление, малый размер и низкий вес. Абсолютные ошибки местоположения не превышают нескольких метров. Срок службы приемника на низкой околоземной орбите, по пессимистичным оценкам, составляет один год вследствие облучения. Ожидаемый срок службы зависит от параметров орбиты. Можно предположить, что приемник сможет проработать в космосе несколько лет.

Благодарности

Я хотел бы поблагодарить моих жену и детей за то терпение, с которым они отнеслись к моим временным и финансовым затратам в период работы над приемником.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Jianping Y., Huamin J., and Qun F.** Application of GPS to space vehicles: analysis of space environment and errors // IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine. Jan 1998. Vol. 13. No.1. P. 25–30.
2. **Montenbruck O., Garcia-Fernandez M., and Williams J.** Performance comparison of semi-codeless GPS receivers for LEO satellites // GPS Solutions. 2006. Vol. 10. P. 249–261.
3. **Grelier T., Ries L., Bataille P., Perrot C., and Richard G.** A new operational low cost GNSS software receiver for microsatellites // Satellite Navigation Technologies and European Workshop on GNSS Signals and Signal Processing (NAVITEC). 2012. P. 1, 5, 5–7.
4. **Gold K. and Brown A.** Architecture and performance testing of a software GPS receiver for space-based applications // Aerospace Conference. 2004. Vol. 4. P. 2404–2416.
5. **Dion A., Calmettes V., and Boutillon E.** Reconfigurable GPS-Galileo receiver for satellite based applications // Proceedings of the 2008 National Technical Meeting of The Institute of Navigation. San Diego, CA. January 2008. P. 277–287.
6. **Kronman J. and McElroy T.** Considerations for the application of GPS in satellites, GPS System Trade Study // ION GPS'94.
7. **Winternitz L., Moreau M., Boegner J., and Sirotzky S.** Navigator GPS receiver for fast acquisition and weak signal space applications // Proceedings of the 17th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS 2004). Long Beach, CA. September 2004. P. 1013–1026.
8. **piNAV-L1** GPS Datasheet, [online] SkyFoxLabs, [vid. 2016-05-16], <http://www.skyfoxlabs.com/product/1-pinav-l1-gps>.

9. **Stirling-Gallacher R., Hulbert A., and Povey G.** A fast acquisition technique for a direct sequence spread spectrum signal in the presence of a large doppler shift // Proc. ISSSTA. 1996. Vol. 1. P. 156–160.
10. **Petrovski I. and Tsujii T.** Digital satellite navigation and geophysics; a practical guide with GNSS signal simulator and receiver laboratory. Cambridge University Press, 2012.
11. **Kaplan E.** Understanding GPS, Principles and Applications. Artech House, 2006.
12. **Kovář P. and Jelen S.** Cold start strategy of the CubeSat GPS receiver // Advances in Electrical and Computer Engineering. 2014. Vol. 14. No. 2. P. 29–34.
13. **Mikhaylov N.V. and Vasil'ev M.V.** Autonomous satellite orbit determination using spaceborne GNSS receivers // Gyroscopy and Navigation. 2011. Vol. 2. No. 1. P. 1–9.
14. **Mikhailov N.V. and Chistyakov V.V.** Signal search methods for space-based GNSS receivers. Part 1. Combined search // Gyroscopy and Navigation. 2013. No. 4. P. 60–71.
15. **Mikhailov N.V. and Chistyakov V.V.** Signal search methods for space-based GNSS receivers. Part 2. Calculation of combined search parameters // Gyroscopy and Navigation. 2014. No. 1. P. 70–80.
16. **Space GPS Receiver – SGR-05U.** [Online]. Available: <https://www.sstl.co.uk/getattachment/97ae8ccc-024d-4376-a99d-7d3c2266a7f7/SGR-05U-05P>. [Accessed: 29- Sep- 2016].
17. **GPSRM 1** GPS Receiver Module. [Online]. Available: http://www.cubesatkit.com/docs/datasheet/DS_CSK_GPSRM_1_710-00908-C.pdf. [Accessed: 29- Sep- 2016].
18. **NSS GPS.** [Online]. Available: <http://www.cubesatshop.com/wp-content/uploads/2016/07/NewSpace-GPS-Receiver.pdf>. [Accessed: 29- Sep- 2016].
19. **Borre K. et al.** A Software-Defined GPS and Galileo Receiver: A Single-Frequency Approach. Birghouser Boston, 2007.

Kovář P. (The Czech Technical University in Prague, Prague, The Czech Republic)
piNAV L1 – GPS Receiver for Small Satellites // Giroskopiya i Navigatsiya. 2016. Vol. 24. No. 4 (95). P. 112–121.

Abstract. piNAV L1 is a GPS L1 receiver for position determination of the small satellites at LEO orbits. The receiver was tested by the ReGen software GPS simulator for static and dynamic scenarios. The typical horizontal position error for static scenario is 2.5 m (95%). The position errors for dynamic scenarios are affected by the dynamic stress errors.

Key words: space navigation, LEO satellite, GPS, receiver testing

Материал поступил 09.05.2016