

УДК 004.056.2:528.061.6

**СТАБИЛИЗАЦИЯ ВОЗМУЩАЮЩИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА ПРИЕМ СИГНАЛОВ  
ИСКУССТВЕННЫХ СПУТНИКОВ ЗЕМЛИ**

*А.И. ЯРИЦА, д-р техн. наук, проф. В.К. ЖЕЛЕЗНЯК  
(Полоцкий государственный университет)*

*Системно исследованы факторы, снижающие точность оценки координаты точки приема сигналов искусственных спутников Земли геодезическими приемниками, установленными на пунктах Спутниковой системы точного позиционирования, размещенных на подстилающей поверхности Земли либо на наземных сооружениях. Показана возможность повышения точности оценки применением конструктивных стабильных по параметрам материалов с улучшенными механическими, тепловыми виброизолирующими свойствами.*

**Ключевые слова:** *Спутниковая система точного позиционирования, постоянно действующие пункты, робастный метод, случайные воздействующие факторы.*

**Введение.** Точность и оперативность обработки измерительной информации обуславливает правильность принятия решений. Точностные измерения необходимы при строительстве и эксплуатации критически важных объектов. Необходимую точность измерительной информации устанавливают в первую очередь назначением критически важного объекта. К таким объектам относятся гидроэлектростанции, атомные электростанции, взрывоопасные объекты, магистральные трубопроводы, объекты железнодорожного и воздушного транспорта и др. Например, надежность магистральных трубопроводов определяется деформационными процессами при строительстве – не более 0,003–0,005 м [1] и эксплуатации – не более 0,01–0,02 м [2]. Точность измерения заданных параметров накладывает ограничения на методы таких измерений и частоту получения данных, а также их обработку.

Теория, методики, конструктивные и технологические решения в геодезической и картографической деятельности в настоящее время основаны на применении спутниковой системы позиционирования GPS [3] для измерений и определения координат точки приема сигналов измерительной информации. Использование GPS-измерений в Республике Беларусь реализовано с помощью Спутниковой системы точного позиционирования (ССТП). Основной целью использования Спутниковой системы точного позиционирования Республики Беларусь является получение координат и высот пунктов геодезического и съемочного обоснования топографических съемок, планирования территорий, проектно-изыскательских работ в строительстве, исполнительных съемок и другого вида работ. Точностные и временные характеристики ССТП в режиме обработки реализуются определением координат пунктов (точек) в ITRS (в реализации ITRF2005) в статическом режиме со средней квадратической погрешностью 0,01 м в плане и 0,02 м по высоте при времени наблюдений 1 ч [4].

Точностные и временные характеристики ССТП в режиме реального времени реализуются определением координат объектов в ITRS (в реализации ITRF2005) в статическом режиме со средней квадратической погрешностью 0,02 м в плане и 0,03 м по высоте [4].

Основой инфраструктуры ССТП являются постоянно действующие пункты (ПДП), находящиеся на подстилающей поверхности Земли. Постоянно действующие пункты являются основным источником информации о координатах точки приема сигналов измерительной информации искусственных спутников Земли (ИСЗ).

Спутниковая система точного позиционирования Республики Беларусь объединяет 90 действующих ПДП и 8 вводимых ПДП в ближайшее время (рис. 1).

Для обеспечения более высоких точностных характеристик ССТП необходимо оценивать параметрические неопределенности ПДП из-за возмущающих случайных воздействий. В спутниковых геодезических измерениях можно выделить три основных источника ошибок [5]:

- 1) ошибки аппаратуры;
- 2) влияние внешних условий;
- 3) ошибки математической обработки.

Цель работы – повышение точности координаты точки приема сигналов ИСЗ стабилизацией возмущающих воздействий на их прием.

**Основная часть.** На точностные характеристики в значительной мере влияют параметры, важнейшие из которых объединены подстилающей поверхностью, на которой находятся постоянно действующие пункты. Для исследования рассмотрим один из центров ССТП.

Постоянно действующие пункты должны удовлетворять следующим требованиям [6]:

- открытость местности вокруг геодезического пункта, отсутствие препятствий по углу возвышения более 10–15°;
- отсутствие отражающих поверхностей, которые могли бы создавать многолучевость;
- отсутствие мощных радио- и телевизионных передатчиков или других излучающих радиотехнических устройств;
- отсутствие движущегося транспорта.

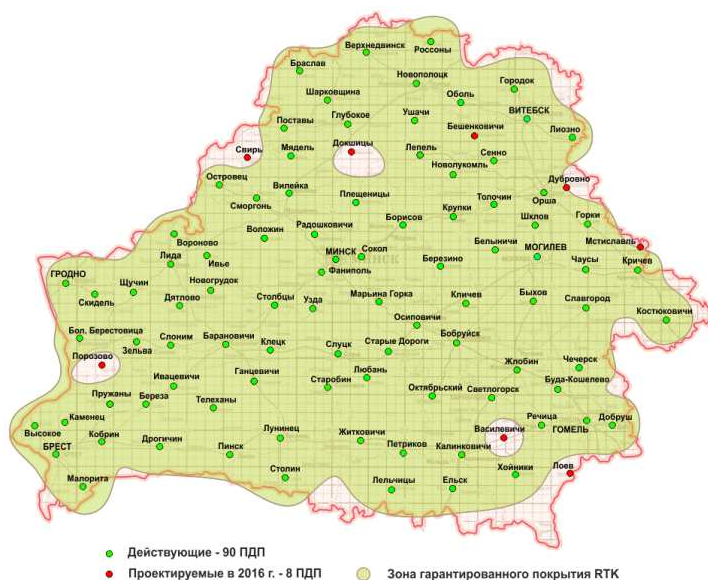


Рисунок 1 – Схема расположения ПДП

Основное требование, предъявляемое к ПДП, это стабильность, долговечность и неподвижность конструкции. Постоянно действующие пункты часто располагают на крышах зданий, используя при этом тип центра 192 [7], схема которого представлена на рисунке 2.

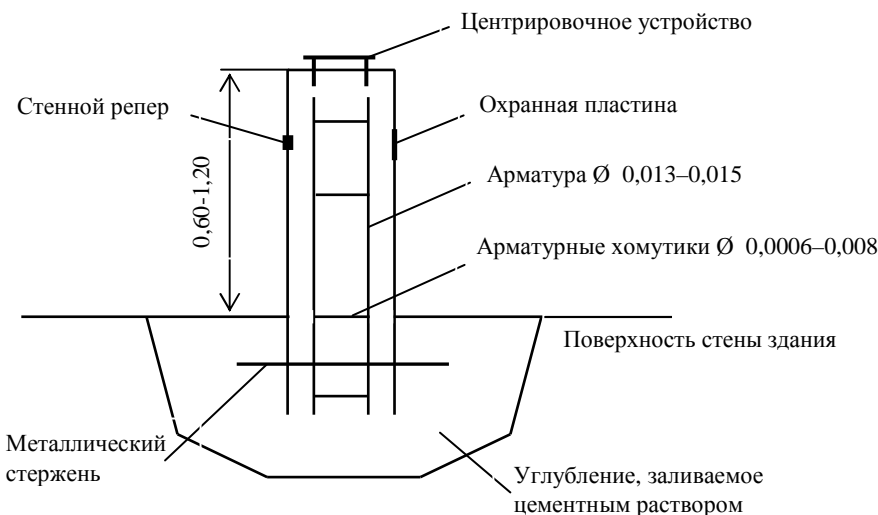


Рисунок 2 – Тип центра 192

Для исследования приемной части сигналов ИСЗ, находящейся на подстилающей поверхности, проанализируем характеристики твердых тел, используемых при строительстве ПДП. К таким материалам можно отнести бетон, гранит, мрамор, сталь и железо.

В таблице 1 представлены основные механические и тепловые свойства твердых тел, полученные из различных источников информации.

Таблица 1 – Основные механические и тепловые свойства твердых тел

Материал	Удельная плотность $\rho$ , кг / м <sup>3</sup>	Модуль упругости Юнга $E$ / Модуль сдвига $G$ , Па	Коэффициент Пуассона (отношение утоньшения к удлинению при растяжении)	Коэффициент линейного теплового расширения $\alpha$ , 1 / К
Бетон	$2,0 \cdot 10^3 \dots 2,4 \cdot 10^3$	$1,5 \cdot 10^{10} \dots 4,0 \cdot 10^{10} / 7,0 \cdot 10^9 \dots 1,7 \cdot 10^{10}$	0,10..0,15	$12,0 \cdot 10^{-6}$
Гранит	$2,5 \cdot 10^3 \dots 3,0 \cdot 10^3$	$3,5 \cdot 10^{10} \dots 5,0 \cdot 10^{10} / 1,4 \cdot 10^{10} \dots 4,4 \cdot 10^{10}$	0,10..0,15	$7,93 \cdot 10^{-6}$
Мрамор	$2,5 \cdot 10^3 \dots 2,8 \cdot 10^3$	$3,5 \cdot 10^{10} \dots 5,0 \cdot 10^{10} / 1,4 \cdot 10^{10} \dots 4,4 \cdot 10^{10}$	0,10..0,15	$8 \cdot 10^{-6} \dots 14 \cdot 10^{-6}$
Кварц	$2,65 \cdot 10^3$	нить: $7,3 \cdot 10^{10} / 3,1 \cdot 10^{10}$	0,17 (нить)	$0,5 \cdot 10^{-6}$
Железо	$7,88 \cdot 10^3$	$1,0 \cdot 10^{11} \dots 1,3 \cdot 10^{11} / 3,5 \cdot 10^{10} \dots 5,3 \cdot 10^{10}$	0,2..0,3	$11,3 \cdot 10^{-6}$
Сталь	$7,7 \cdot 10^3 \dots 7,9 \cdot 10^3$	$1,7 \cdot 10^{11} \dots 2,06 \cdot 10^{11} / 8,0 \cdot 10^9 \dots 8,0 \cdot 10^{10}$	0,24..0,30	$11,9 \cdot 10^{-6}$
Стекло	$2,50 \cdot 10^3 \dots 2,59 \cdot 10^3$	$4,9 \cdot 10^{10} \dots 7,8 \cdot 10^{10} / 1,75 \cdot 10^{10} \dots 2,9 \cdot 10^{10}$	0,20..0,30	$8,5 \cdot 10^{-6}$

Материалы, используемые чаще всего при строительстве геодезических пунктов, – бетон и железная арматура диаметром 0,013–0,015 м, а также арматурные хомуты с диаметром 0,006–0,008 м. Закрепляют данные пункты с помощью цементного раствора, который заливают в углубление.

Наименьший коэффициент линейного теплового расширения материалов, представленных в таблице 1, у кварца. Его линейное расширение в несколько раз ниже остальных материалов. Однако это достаточно дорогой материал, сложный в обработке.

Низкими коэффициентами линейного теплового расширения обладают также гранит и некоторые виды мрамора. При сравнении стоит учитывать, что прочность гранита выше, чем у мрамора, в 2 раза. Твердость обеспечивается за счет присутствия кварца. В отличие от того же мрамора, гранитные изделия не теряют свои эксплуатационные показатели и внешний вид в условиях температурного перепада, составляющего более 100 °С. Гранит выдерживает перепады температуры от –60 до +50 °С.

Нестабильность параметров позволяет разделить их по временным характеристикам. Обеспечение высоких точностных параметров основано на стабилизации случайных возмущающих воздействий, оцениваемых объективным критерием робастности. Под робастностью будем понимать состояние, в котором характеристики материала нечувствительны к воздействию дестабилизирующих, возмущающих факторов. Возмущающие воздействия, влияющие на ПДП, являются случайными, т.е. обладают параметрической неопределенностью [8]. Параметрическая неопределенность обусловлена воздействиями на параметры сигнала случайными колебаниями.

Основные факторы, влияющие на снижение стабильности и неподвижности конструкции ПДП, – вибрация, смена пор года, температура. Рассмотрим их подробнее.

**Вибрации.** Вибрация является важным случайным влияющим фактором. Для увеличения точностных характеристик измерительной информации необходимо снижать влияние вибрации на ПДП.

Пункты ССП Республики Беларусь располагают на несущих стенах зданий, тем самым снижая влияние вибраций на точность измерений.

Стоит отметить, что действующая в нашей стране сеть по своему принципу действия является аналогом международной GPS-службы (IGS). Эта всемирная спутниковая сеть состоит на данный момент из более 500 постоянно действующих пунктов, расположенных по всему земному шару и обеспечивающих с миллиметровой точностью координаты [9]. Постоянно действующие пункты этой сети по своему геометрическому расположению центра можно разделить на наземные и те, которые располагают на крышах зданий. Для придания стабильности геометрического положения и снижения влияния вибраций наземные ПДП чаще всего закладывают в скальные породы. Пункты, находящиеся на крышах зданий, устанавливают на отдельных платформах или стальных вышках.

Выбор места установки ПДП относят на значительное расстояние от магистральных трубопроводов, железнодорожных путей, автодромов, заводских цехов с работающими установками и др. Если существует необходимость расположения пункта рядом с источником вибраций, применяют песочные подушки, амортизаторы, а также виброизолированные двойные фундаменты, предназначенные для снижения ударного воздействия на пункты и демпфирования упругих волн [10].

Для снижения влияния вибрации в конструкции ПДП применяют материалы, обладающие виброизолирующими свойствами. При действии внешних сил на объект его элементы испытывают механические напряжения, зависящие как от уровня сил, так и от свойств материалов. Устойчивость конструктивных элементов к механическим воздействиям зависит от допустимых остаточных деформаций. Способность различных материалов поглощать механическую энергию иллюстрируется полной энергией деформации (табл. 2).

Таблица 2

Материал	Полная энергия деформации, кг·м <sup>2</sup> /с <sup>2</sup>
Сталь	0,93
Фосфористая бронза	1,24
Листовой алюминий	2,30
Отожженная пружинистая сталь	29,04
Резина	4450

Резина обладает высокими виброизолирующими свойствами. Применение этого материала повышает точность оценки координаты точки приема сигналов ИСЗ, размещенной на подстилающей поверхности Земли либо на наземных сооружениях, находящихся рядом с источниками вибрации.

Из конструкционных материалов наибольшим поглощением энергии обладают вязкие материалы (алюминий и его литейные сплавы, холоднокатаная сталь), различные эластичные изоляционные материалы, резина и пружинистые стали [11].

**Смена пор года.** Воздействие этого фактора на стабильность и неподвижность конструкции ПДП имеет двойной характер. С одной стороны, это разрушения пунктов от коррозии. Вследствие постоянной смены температур железобетонные конструкции пунктов расширяются и сжимаются. Это неизбежно приводит к возникновению трещин, в которые затем попадает влага и на арматуре возникают коррозионные процессы. Под воздействием коррозии пункт теряет свою стабильность, более подвержен влиянию вибраций и других нагрузок. Для защиты от воздействия постоянного перепада температур в конструкции ПДП можно заменить железную арматуру пункта на арматуру, состоящую из композитных материалов, более стойкую к воздействию влаги и температуры [12]. Однако из всех рассматриваемых материалов (см. табл. 1), предлагаемых для изготовления пунктов, наиболее высокой стойкостью к коррозии обладает гранит (за счет своей природной однородности).

С другой стороны, смены пор года оказывают влияние на подстилающую поверхность, на которой находится ПДП. Проанализировав информацию по расположению пунктов всемирной спутниковой сети в разные поры года, можно сделать вывод, что зимой ПДП поднимаются по высоте на 0,005–0,01 м, а летом наоборот – опускаются на 0,005–0,01 м. Суммарная величина изменения положения ПДП по высоте составляет от 0,01 до 0,02 м. Наиболее низкие показатели смещения по высоте были отмечены у ПДП, установленных в скальные породы.

Кроме того, сравнивая материалы по влиянию смен пор года нужно руководствоваться характеристикой морозостойкости. Морозостойкость материала – это один из важных элементов его долговечности. Морозостойкость выражается в количестве циклов заморзания и оттаивания, при котором материал теряет не более 5% своих прочностных качеств. Высокой морозостойкостью (от 25 циклов) обладают такие материалы, как гранит, мрамор, бетон, сталь.

**Температура.** Важнейшее влияние на стабильность ПДП оказывает температура. Средняя годовая температура Беларуси равна +5,4 °С. Максимальная зарегистрированная температура воздуха составляет +44 °С, минимальная – минус 40 °С. Стоит учитывать, что почва нагревается сильнее, ее максимальная температура достигает +66 °С. Таким образом, перепады температур составляют 70–100 °С. При таком тепловом воздействии, используя данные, представленные в таблице 1, можно посчитать, что стальной стержень длиной 1 м будет расширяться более чем на 0,001 м. Примерно такую же погрешность даст и конструкция из бетона.

**Заключение.** Возмущающие случайные воздействия косвенно влияют на точность приема геодезическим приемником сигналов ИСЗ. Точность определяется координатами точки установки геодезиче-

ского приемника и его отклонением от этой точки. Факторы, повышающие точность оценки, обусловлены робастностью основных механических и тепловых свойств гранита, на котором закреплен геодезический приемник. К основным робастным свойствам следует отнести коэффициент линейного теплового расширения, коррозионную стойкость, устойчивость к влиянию вибрации. Предложено изоляцию геодезического приемника обеспечивать вибропоглощающими резинами, амортизаторами, песочными подушками, двойным фундаментом, защитить ее от влияния отрицательных температур, сузив температурный диапазон воздействия на гранитную подставку.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Субботин, И.Е. Инженерно-геодезические работы при проектировании, строительстве и эксплуатации магистральных нефтегазопроводов. – М. : Недра, 1987. – 139 с.
2. Руководство по геодинамическим наблюдениям и исследованиям для объектов топливно-энергетического комплекса. – М. : Гидропроект, 1997 – 121 с.
3. Пыко, Т.В. Основные направления модернизации государственной геодезической сети Республики Беларусь / Т.В. Пыко // Земля Беларуси. – 2007. – № 4. – С. 35–36.
4. Республиканское унитарное предприятие аэрокосмических методов в геодезии «Белэрокомогеодезия» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [<http://www.geo.by/ru/for-organizations/precise-positioning-service/>].
5. Антонович, К.М. Использование спутниковых радионавигационных систем в геодезии : в 2 т. : моногр. / К.М. Антонович ; ГУО ВПО «Сибирская государственная геодезическая академия». – М. : ФГУП «Картгеоцентр», 2006. – Т. 2. – 306 с.
6. Техническая инструкция по созданию и реконструкции геодезических сетей в населенных пунктах : приказ Гос. ком. по имуществу Респ. Беларусь, 16.02.2010 г., № 37.
7. Государственная геодезическая сеть Республики Беларусь. Порядок создания геодезической сети 1 класса : ТКП 119-2007(03150). – Минск : Гос. ком. по имуществу Респ. Беларусь 2009. – 47 с.
8. Тихонов, В.И. Статистический анализ и синтез радиотехнических устройств и систем : учеб. пособие для вузов / В.И. Тихонов, В.Н. Харисов. – М. : Радио и связь, 1991 – 608 с.
9. International GNSS Service [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [<http://igs.org/>].
10. Банкетов, А.Н. Кузнечно-штамповочное оборудование : учеб. для машиностроительных вузов / А.Н. Банкетов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Машиностроение, 1982. – 576 с.
11. Фролов, А.Д. Теоретические основы конструирования и надежности радиоэлектронной аппаратуры / А.Д. Фролов. – М. : Высш. шк., 1970. – 488 с.
12. Арматура композитная полимерная для армирования бетонных конструкций. Общие технические условия : ГОСТ 31938 – 2012. – М. : Стандартинформ. 2014. – 34 с.

Поступила 17.03.2016

#### THE STABILIZATION OF THE PERTURBING ACTIONS ON SIGNAL RESEPTIONS OF ARTIFICIAL SATELLITES

A. YARYTSA, V. ZHELEZNYAK

*The factors that reduce the accuracy of the estimate coordinates of the reception signal of an artificial Earth satellites by the geodetic receivers, which were installed at locations of satellite system exact positioning, were placed on the underlying structures or on the ground surface of the Earth were systematically examined. A possibility of increasing the accuracy of estimation using the parameters of stable structural materials with improved mechanical, thermal anti-vibration properties was showed.*

**Keywords:** *satellite system of the exact positioning, permanent items, robust estimation, random influencing factors.*