

УДК 004.052.2

ОЦЕНКА ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ТОЧНОСТЬ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КООРДИНАТ ТОЧКИ ПРИЕМА СИГНАЛОВ СПУТНИКОВОЙ СИСТЕМЫ ТОЧНОГО ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ ПРИ ДИНАМИЧЕСКИХ ВЕТРОВЫХ НАГРУЗКАХ

А.И. ЯРИЦА

(Полоцкий государственный университет)

Повышение точности координат объекта, полученных с помощью спутниковой системы точного позиционирования Республики Беларусь, является актуальной и важной задачей. Рассмотрены конструктивные и методические методы снижения влияния природных воздействующих факторов на точность приема сигналов GPS. Представлена математическая обработка ветрового воздействия на постоянно действующий пункт.

Ключевые слова: спутниковая система точного позиционирования, постоянно действующие пункты, воздействующие факторы, ветровое давление.

Введение. Проблема обеспечения надежности передачи сигналов при наличии помех является одной из важнейших в прикладной теории информации. Надежность передачи сигналов в радиотехнической системе в значительной мере определяется ее помехоустойчивостью – способностью противостоять вредному воздействию помех [1]. Оценка помехоустойчивости производится на основе рассмотрения соотношения между помехой и сигналом, при котором обеспечивается заданное качество функционирования устройства передачи информации.

Данная проблема возникла в геодезии с внедрением спутниковых технологий в геодезические измерения. **Спутниковое позиционирование** — метод определения координат объекта в трехмерном пространстве с помощью спутниковых систем. Системы спутникового позиционирования — современные средства координатно-временного обеспечения разнообразных работ, спектр которых с каждым годом увеличивается. Основным достоинством спутниковых систем позиционирования является их глобальность, оперативность, всепогодность и оптимальная точность.

В Беларуси спутниковые измерения представлены спутниковой системой точного позиционирования (ССТП), которая объединяет 98 постоянно действующих пунктов (ПДП) равномерно расположенных на всей территории страны. Постоянно действующий пункт представляет собой железобетонную подставку с установленным на ней спутниковым геодезическим приемником. Несмотря на прогресс, в настоящее время сложилась проблемная ситуация, когда существуют противоречия между методической и инструментальной погрешностью. Точность геодезических антенн достигает 2 мм в плане и 3 мм по высоте. Однако точность определения координат объектов, предоставляемых ССТП Республики Беларусь ниже: точность определения в плане составляет 25 мм, а по высоте – 30 мм. Повышение точности координат, получаемых от спутниковой системы, позволит глобально расширить спектр ее применения:

- наблюдение за деформациями земной коры,
- монтаж и мониторинг магистральных трубопроводов, строительство гидро- и атомных электростанций,
- снижение стоимости этих работ и оперативность их выполнения.

В мире уже существует такой пример, реализованный в виде международной службы IGS, предоставляющей координаты объектов в ITRF с точностью до 5 мм.

Основная часть. От приборной точности геодезических приемников, точность, получаемая спутниковой системой, отличается в большей степени вследствие непосредственного соприкосновения окружающей среды, так как подвергается внешним температурным (сезонным и суточным изменениям температуры, перегреву поверхности солнечным излучением) и механическим, например, ветровым и вибрационным, воздействиям. Указанные внешние факторы в той или иной мере влияют на каждый постоянно действующий пункт, в связи с чем снижается точность всей спутниковой сети и возникает необходимость оценки влияния и определения путей повышения устойчивости к ним.

В связи с тем, что ПДП ССТП Республики Беларусь в основном установлены на крышах зданий, то для получения полной информации в сложившейся ситуации требуется дать оценку возмущающего

воздействия как на подстилающую поверхность (в данном случае здания и сооружения), так и на сам геодезический приемник.

Атмосфера всегда находится в непрерывном случайном движении относительно Земли. Это движение воздушных масс проявляется в виде ветра. Скорость ветра определяют, как сумму двух составляющих: постоянной и переменной. Составляющую скорости ветра считают постоянной, если в течение 2 мин ветер сохраняет свою скорость и его направление меняется не более чем на один румб. Плотность вероятности постоянной составляющей скорости ветра имеет закон распределения вероятности Рэлея [2]:

$$f(W) = \frac{W}{\sigma^2} e^{-\frac{W^2}{2\sigma^2}}$$

В этой формуле среднее квадратическое отклонение постоянной составляющей скорости ветра зависит от высоты над поверхностью Земли. В приземном слое атмосферы среднее квадратическое отклонение выражается следующей зависимостью от высоты:

$$\sigma = \frac{2}{\pi} m_{w_0} \left(\frac{H}{H_0}\right)^n,$$

где m_{w_0} – математическое ожидание скорости ветра на некоторой опорной высоте H_0 ;

H – текущая высота;

n – показатель степени, величину которого рекомендуется выбирать в пределах 0,15–0,20.

При опорной высоте $H_0 = 10$ м рекомендуется принимать $m_{w_0} = 3 - 4 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$.

Переменная составляющая скорости ветра, пульсация, характеризует турбулентное движение атмосферы, выражающееся в хаотическом случайном перемещении частиц воздуха.

Оценка фактора ветрового воздействия затрудняется тем, что действующие нормативно-регламентированные методики не содержат рекомендаций по назначению аэродинамических коэффициентов для сложных и уникальных по форме зданий и не учитывают влияние сочетания форм здания, изменения спектра набегающего потока, рельефа. Наличие в ветровом потоке сдвига и пульсаций скорости еще более усложняет ситуацию, приводя к дополнительным нестационарным воздействиям. Нестационарный расчет – это анализ процесса во времени, именно он даст наиболее правдоподобные результаты. Для создания и обработки такой математической модели потребуются огромные вычислительные мощности, и в разумные сроки эту задачу можно решить лишь на суперкомпьютере [2].

Однако можно оценить ветровое воздействие на здания типовой, простой прямоугольной формы. Так, на рисунке 1 представлена схема обтекания здания потоком воздуха.

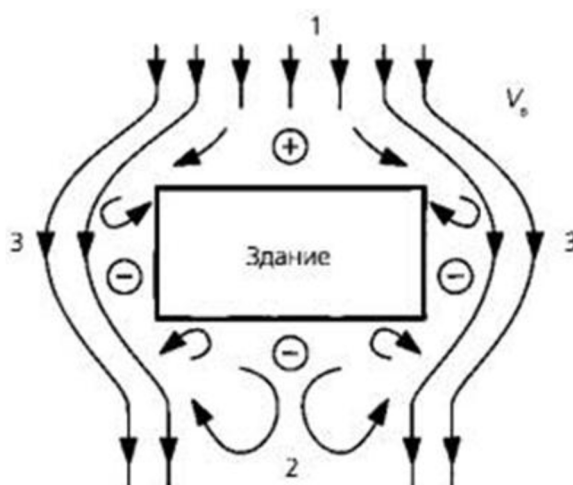
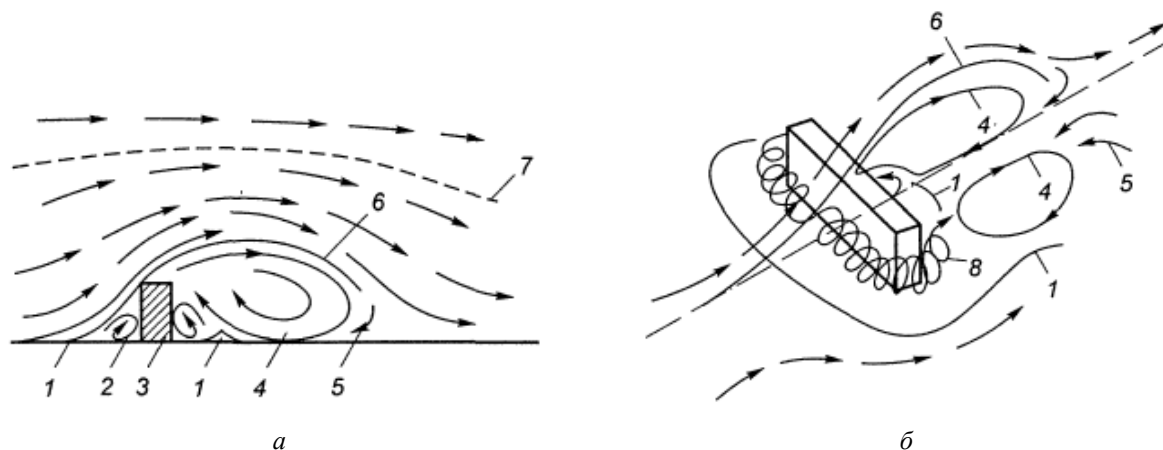


Рисунок 1. – Схема ветровых потоков (горизонтальный разрез)

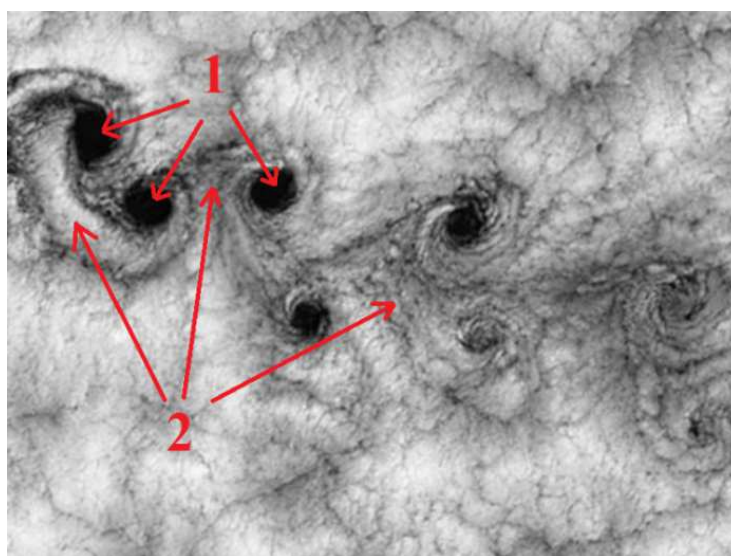
Набегающий поток воздуха образует зону циркуляции у наветренной поверхности здания (рисунок 2). При этом поток ветра затормаживается, кинетическая энергия этой части потока переходит в потенциальную и статическое давление в зоне аэродинамического следа возрастает. Часть воздуха наветренной зоны в виде вихрей уходит в заветренную сторону здания [3].



а – вертикальный разрез; **б** – схема движения воздуха в зоне аэродинамического следа;
1 – граница между вихрями в зоне аэродинамического следа, участок с нулевой скоростью движения воздуха, **2** – зона избыточного давления, **3** – здание, **4** – зона разрежения и вихревого движения воздуха, **5** – обратные потоки воздуха, входящие в зону аэродинамического следа, **6** – граница зоны аэродинамического следа, **7** – граница влияния здания на поток воздуха, **8** – вихреобразные потоки воздуха из зоны избыточного давления в зону разрежения

Рисунок 2. – Схема обтекания здания потоком воздуха

Исследования, проведенные для отдельно стоящего здания при установившемся потоке, позволили выявить лишь принципиальную схему потоков воздуха вблизи здания. В реальных условиях поток воздуха обычно неустановившийся. Пульсирующие изменения направления и силы ветра приводят к тому, что в натуральных условиях габариты зоны аэродинамического следа и циркуляция воздуха в пределах зоны изменяются во времени. При обтекании ветром группы зданий зоны аэродинамических следов влияют друг на друга, и аэродинамика обтекания усложняется [3]. Космические съемки демонстрируют такие изменения, представленные на рисунке 3.



1 – зданий и сооружений, обтекаемые ветром; **2** – вихревые потоки
 Рисунок 3. – Образование вихревых ветровых потоков вокруг группы зданий и сооружений

Для расчета ветровой нагрузки на здания и сооружения воспользуемся [4]. Особенностью вычислений является то, что до последней редакции в 2011 году ветровая нагрузка определялась по формуле

$$w_m = w_0 \cdot c \cdot k_{(z)} \tag{1}$$

где w_m – нормативное значение средней составляющей ветровой нагрузки;
 w_0 – нормативное ветровое давление в зависимости от принадлежности объекта к ветровому району;
 c – аэродинамический коэффициент;
 $k_{(z)}$ – коэффициент, учитывающий изменение ветрового давления в зависимости от типа местности и высоты [4].

После редакции 2011 года в [4] обязательным стал учет пульсационной w_p -составляющей ветровой нагрузки

$$w_{+(-)} = w_0 k(z_e) [1 + \xi(z_e)] c_{p_{+(-)}} v_{+(-)}, \tag{2}$$

где $w_{+(-)}$ – нормативное значение пикового положительного и отрицательного воздействия ветровой нагрузки;
 z_e – эквивалентная высота (приравниваемая высоте здания);
 $k(z_e), \xi(z_e)$ – коэффициенты, учитывающие соответственно изменение давления и пульсаций давления ветра на высоте z_e ;
 $v_{+(-)}$ – коэффициенты корреляции ветровой нагрузки, соответствующие положительному давлению (+) и отсосу (-);
 $c_{p_{+(-)}}$ – пиковые значения аэродинамических коэффициентов положительного давления (+) или отсоса (-).

Применим данные формулы (2) для получения расчетного ветрового давления для стандартной прямоугольной конструкции. Для примера возьмем пятиэтажный дом, имеющий следующие параметры: ширину $a = 15$ м, длину $b = 100$ м, высоту $h = 18$ м, находящийся в I ветровом районе, тип местности – городская застройка, аэродинамический коэффициент, равный 0,8, и коэффициент логарифмического декремента колебаний δ для железобетонных и каменных сооружений, равный 0,3.

При расчете будем учитывать, что ветровое давление направлено на сторону b . Для получения нагрузки выберем две точки на высоте 10 и 17 м. Результаты вычислений представлены в таблице.

Таблица. – Результаты расчета ветрового давления

| Точка измерения | Высота, м | Расчетное среднее давление на высоте, кПа | Расчетное суммарное давление на высоте, кПа |
|-----------------|-----------|---|---|
| Первая | 10 | 0,167 | 0,312 |
| Вторая | 17 | 0,204 | 0,415 |

По результатам применения формулы получаем суммарное расчетное давление во второй точке, равное 0,450 кПа или 45,8 кг/м². Построим график (рисунок 4)

В ходе системного анализа выделены основные конструктивные решения по снижению ветрового воздействия на здания. Большое влияние на его устойчивость к нагрузкам имеет форма. Приоритеты форм следующие: лидеры – здания с круглым, овальным, каплевидным планом; следующая группа – здания с треугольным планом со скругленными углами; далее – прямоугольные, квадратные, четырехугольные планы. Правильное расположение здания с учетом розы ветров и других сооружений, также значительно снизит влияние ветра. Однако, учитывая особенности работы геодезических приемников, соседний здания не должны быть значительно выше, так как для качественного приема спутниковых сигналов должен быть максимально открытый горизонт.

Исследование влияния внешних воздействий на спутниковые геодезические приемники, проведенное в предыдущей работе [5], указывает на возможность оптимизации конструкторских решений, однако полностью исключить такое влияние не представляется возможным. В связи с этим можно отметить эффективность предлагаемой теоретической модели управления параметрами спутниковой системы в процессе эксплуатации геодезического приемника с учетом реальных воздействий окружающей среды

и результатов априорного анализа этих воздействий на математических моделях в процессе проектирования. Для реализации такой модели необходимо в процессе эксплуатации геодезических приемников, установленных на ПДП, контролировать климатические параметры окружающей среды: температуру и интенсивность потока солнечного излучения, скорость и направление ветра.

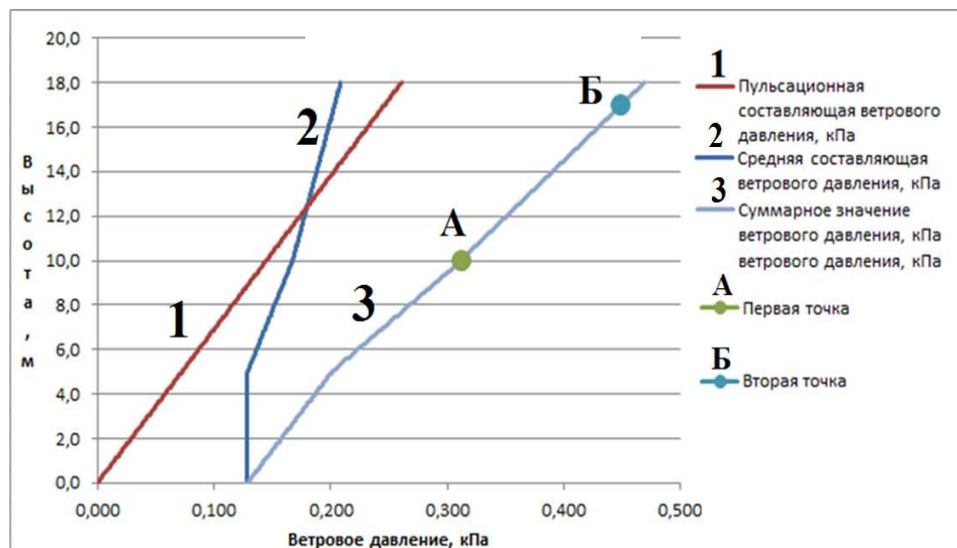


Рисунок 4. – Расчетные значения ветрового давления

В соответствии с этой схемой предлагается скорость и направление ветра измерять с помощью анемометра и румбометра соответственно, которые могут быть объединены в едином метеорологическом приборе анеморумбометре (рисунок 5). Эти приборы имеют достаточно высокую точность. Так, например, манометрический анемометр позволяет определить мгновенную скорость ветра с точностью 0,01 м/с.

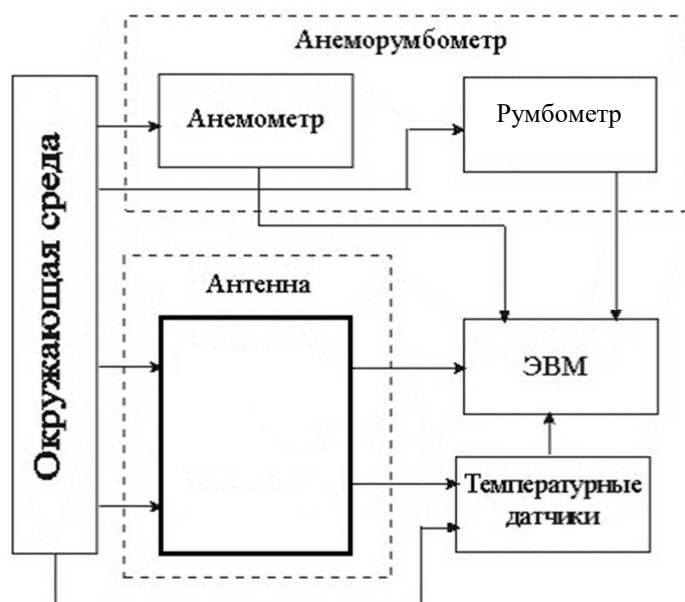


Рисунок 5. – Схема контроля параметров антенны с учетом воздействий окружающей среды

Температурные датчики несут информацию о температуре окружающей среды и температуре поверхности ПДП в его характерных точках.

Измеренные параметры скорости и направления ветра, а также температуры окружающей среды и ПДП в контрольных точках позволяют получить из базы данных информацию о поведении этого пунк-

та в конкретных условиях и соответствующих характеристиках. Это дает возможность скорректировать характеристики приемника и сигнала на его выходе, приблизив их к тем, которые были у приемника без внешних воздействий на него [6].

Таким образом, с учетом данных о состоянии окружающей среды и результатов априорного анализа поведения конструкции постоянно действующего пункта с геодезическим приемником в текущих условиях эксплуатации появляется возможность вносить поправки в реальные характеристики координат приемника и решения, принимаемые спутниковой системой, в составе которой он используется.

Чтобы оценить изменение точности определения координат в реальных условиях эксплуатации, а также их зависимость от параметров приемника, необходимо определить влияние изменений окружающей среды на соотношение сигнал/шум, зависящее от мощности полезного сигнала и мощности шумов и помех, действующих на входе приемника. Мощность принимаемого сигнала P_2 рассчитывается по формуле уравнения мощности аналогично, как и для двухпозиционной радиолокационной системы [7]:

$$P_2 = P_1 \frac{G_1 G_2 \lambda^2 F}{(4\pi)^2 R_H^2},$$

где P_1 – мощность сигнала, излучаемого антенной передатчика;
 G_1, G_2 – коэффициенты усиления передающей и приемной антенн соответственно;
 λ – длина волны излучения;
 R_H – дальность между спутником и приемником;
 F – интерференционный множитель, учитывающий отражение от подстилающей поверхности.

Заключение. В ходе системного анализа и расчетных данных влияния ветровой нагрузки на здание можно сделать вывод о том, что нагрузка при постоянной скорости ветра возрастает линейно с увеличением высоты. Пульсация ветра имеет нелинейную зависимость и суммарное расчетное значение, учитывающее постоянную составляющую скорость и пульсацию, превосходит нормативное значение на 40%.

Использование робастно устойчивых материалов и конструкций позволит снизить внешнее воздействие на постоянно действующие пункты. Так, в архитектуре хорошо себя зарекомендовали сферические, обтекаемые ветром формы. Перед установкой пункта требуется уделить внимание месту его расположения: рассчитать розу ветров и выбирать невысокие, окруженные другими постройками здания. Анализ литературы позволил выделить такие методы снижения ветровой нагрузки на пункт, как ограждение и обваловка.

Несмотря на робастно устойчивые материалы и конструкции, полностью убрать внешнее возмущающее воздействие невозможно. Эффективным методом снижения воздействия может стать использование результатов априорного анализа внешних воздействий на спутниковые геодезические приемники на этапе проектирования пунктов и, в дальнейшем, учета последствий этого влияния в процессе эксплуатации для обеспечения помехоустойчивости информационных коммуникаций в спутниковой системе точного позиционирования. На данный момент проходит анализ и разработка такой интеллектуальной системы.

Автор благодарит научного руководителя, доктора технических наук, профессора В.К. Железняк, за оказанную помощь в проводимых исследованиях.

ЛИТЕРАТУРА

1. Харкевич, А.А., Борьба с помехами / А.А. Харкевич. – М. : Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2009. – 280 с.
2. Оленьков, В.Д. Численное моделирование ветрового воздействия на уникальные здания / В.Д. Оленьков, П.И. Пузырев // Академический Вестник УРАЛНИИПРОЕКТ РААСН. Сер. Строительные науки. – 2014. – № 4. – С. 87–89.
3. Богословский, В.Н. Отопление и вентиляция : учебник для вузов : в 2 ч. / В.Н. Богословский. – М. : Стройиздат, 1976. – Ч. 2 : Вентиляция. – 439 с.

4. Строительные нормы и правила. Нагрузки и воздействия : СНиП 2.01.07-85. – Введ. 01.01.87. – М. : [б.и.], 2011. – 81 с.
5. Железняк, В.К. Анализ случайных физических явлений, снижающих точность координат точки прием сигналов GPS / В.К. Железняк, А.И. Ярица // Современные средства связи : материалы XXI Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 20–21 окт. 2016 г. / Белорусская государственная академия связи ; редкол.: А.О. Зеневич [и др.]. – Минск, 2016. – С. 240–243.
6. Якимов, А.Н. Обеспечение помехоустойчивости информационных коммуникаций в интеллектуальной радиолокационной системе / А.Н. Якимов, В.Б. Лебедев // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2012. – № 1 (21). – С. 124–132.
7. Горбалысов, М.С. Оценка влияния параметров антенны на характеристики радиолокационной системы обнаружения / М.С. Горбалысов, А.Н. Якимов // Цифровые модели в проектировании и производстве РЭС : межвуз. сб. науч. тр. / Пенз. гос. ун-т ; под ред. Н. К. Юркова. – Пенза, 2011. – Вып. 16. – С. 148–152.

Поступила 26.03.2018

**EVALUATION OF IMPACT ON ACCURACY OF DETERMINATION OF COORDINATES
OF THE ACCEPTANCE POINT OF SIGNALS OF THE SATELLITE SYSTEM
OF ACCURATE POSITIONING AT DYNAMIC WIND LOADS**

A. YARYTSA

Increasing the accuracy of the coordinates of the object obtained with the help of the satellite system of precise positioning of the Republic of Belarus is an actual and important task. The article deals with constructive and methodical methods of reducing the influence of the factors that influence. The mathematical treatment of the wind effect is presented.

Keywords: *satellite system of precise positioning, permanently operating points, influencing factors, wind pressure.*