

Определение характеристик систем мониторинга глобальных деформаций на судах и морских сооружениях на основе ГНСС ГЛОНАСС/GPS

1 Общие принципы мониторинга глобальных деформаций на судах и морских сооружениях на основе ГНСС ГЛОНАСС/GPS

1.1 Мониторинг глобальных деформаций на судах и морских сооружениях может быть реализован с внедрением новой системы, которая реализуя возможности глобальных навигационных систем (ГНСС) ГЛОНАСС и GPS, измеряет и отображает продольные и поперечные деформации корпуса судна/морского сооружения, возникающие от воздействием нагрузки, прилагаемой к различным его частям извне.

Для крупнотоннажных судов, судов ледового плавания и морских сооружений сильное встречное волнение, наезд на торосистый лед или айсберг может стать причиной потери общей прочности.

1.2 Путем измерения движения судна, линейных и продольных изгибов конструкций корпуса, в режиме реального времени, можно определить начало и тяжесть деформаций корпусных конструкций судна/морского сооружения при сильном волнении на море, и влиянии различных конфигураций льда на корпус судна/морского сооружения.

На тихой воде или на стопе во льдах, напряжения в продольных связях судна/морского сооружения обычно невелики, так как вес секций судна достаточно равномерно уравновешен силами поддержания воды.

1.3 Принцип измерений трехмерных интегральных деформаций корпуса судна/морского сооружения состоит в обработке данных о фазовых сдвигах, принятых приемниками ГЛОНАСС/GPS, радиосигналов и определении взаимного положения, размещенных в определенных местах,

антенн приемников радиосигналов ГНСС ГЛОНАСС/GPS в реальном времени с сантиметровой точностью.

В частности, для судна, при нахождении его на спокойной воде и без движения во льдах, исходное положение расположенных на нем антенн ГНСС ГЛОНАСС/GPS должно быть близким к прямой линии вдоль диаметральной плоскости судна (см. рисунок 1).

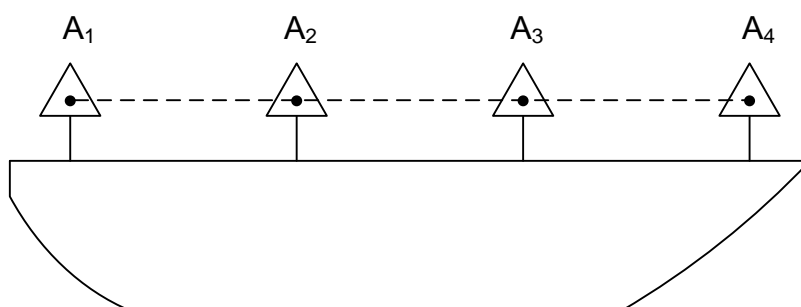


Рисунок 1 – Корпус судна не изогнут на спокойной воде, антенны на одной линии

При сильном волнении или при наезде на торосистый лед с большой скоростью, возникают предельные напряжения в продольных связях судна. В этом случае при нахождении миделя судна на вершине или на подошве волны, или при сильном давлении льда на носовую оконечность судна в его средней части и в оконечностях появляется разность между силами веса и силами поддержания.

Суммарные силы, давящие на корпус в оконечностях судна, по направлению противоположны силам, давящим в средней части. В результате корпус судна находится под действием значительного изгибающего момента, который при движении судна относительно волн или во льдах изменяется с большой амплитудой. Эта ситуация усугубляется при оголении оконечностей судна, при залипании носовой части палубы или при сильном ударе об лед на большой скорости (см. рисунок 2).

На величину продольного изгибающего момента влияют также инерционные силы, обусловленные вертикальными ускорениями движения корпуса. В зависимости от разности фаз колебаний судна и волн они могут увеличивать либо уменьшать величину изгибающего момента. Изменяющийся с большой амплитудой динамический изгибающий момент приводит к значительным колебаниям напряжений в продольных связях, в обшивке палубы и днища в центральной части судна, к появлению в этих элементах остаточных деформаций. Следствием может быть их повреждение, и даже разрывы, приводящие иногда к перелому корпуса.

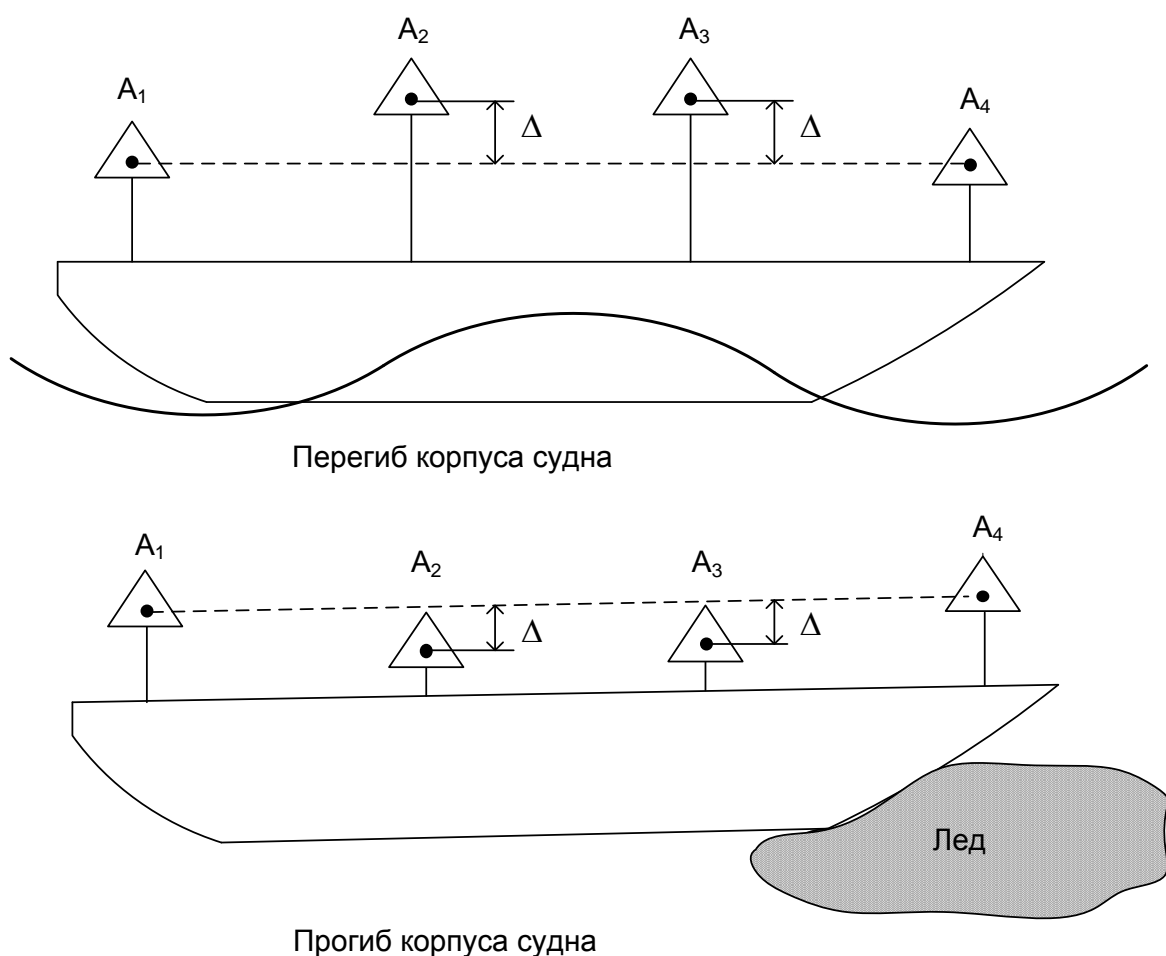


Рисунок 2 – Корпус судна деформирован в результате воздействия волнения или льда, появляется стрела перегиба/прогиба

1.4 Известны технологии для определения относительного положения пространственных точек, основанные на фазовых измерениях в ГНСС. Система измерения деформаций корпуса судна/морского сооружения, построенная на этой технологии, включает один базовый приемник радиосигналов ГНСС с базовой антенной, несколько разнесенных по корпусу судна/морского сооружения дополнительных приемников с антеннами, систему связи и программное обеспечение для проведения вычислений.

Ноу-хау такой системы является возможность определения деформаций корпуса судна/морского сооружения, возникающих под влиянием внешних воздействий, путем расчета величины стрелы прогиба/перегиба (величины интегральной деформации корпуса судна/морского сооружения в вертикальной плоскости) по измеренным данным фазовых разностей радиосигналов ГНСС, с использованием специального программного обеспечения, устанавливаемого в компьютере системы.

Задачей построения данной системы, на основе технологий ГНСС, является – обеспечение возможности непрерывного автоматического измерения (мониторинга) величины стрелы прогиба/перегиба корпуса судна/морского сооружения в целях обеспечения безопасности.

1.5 Для судов решение указанной задачи достигается тем, что к корпусу судна неподвижно присоединяют несколько приемных спутниковых антенн так, что при отсутствии внешних воздействий на корпус судна, все приемные антенны находятся, приблизительно, на одной линии.

Приемники радиосигналов ГНСС подключены к спутниковым антеннам следующим образом:

- базовый приемник – к крайней (носовой или кормовой) антенне;
- дополнительные приемники – к антеннам разнесенным вдоль корпуса судна на прямой линии близкой к диаметральной плоскости судна.

Базовый приемник работает в режиме базовой станции, дополнительные – в режиме кинематики реального времени (RTK) с разрешением неоднозначностей фазовых измерений в движении (OTF).

Принципиальная схема системы измерения деформаций корпуса судна при плавании в условиях сильного встречного волнения или при наезде на торосистый лед приведена на рисунке 3.

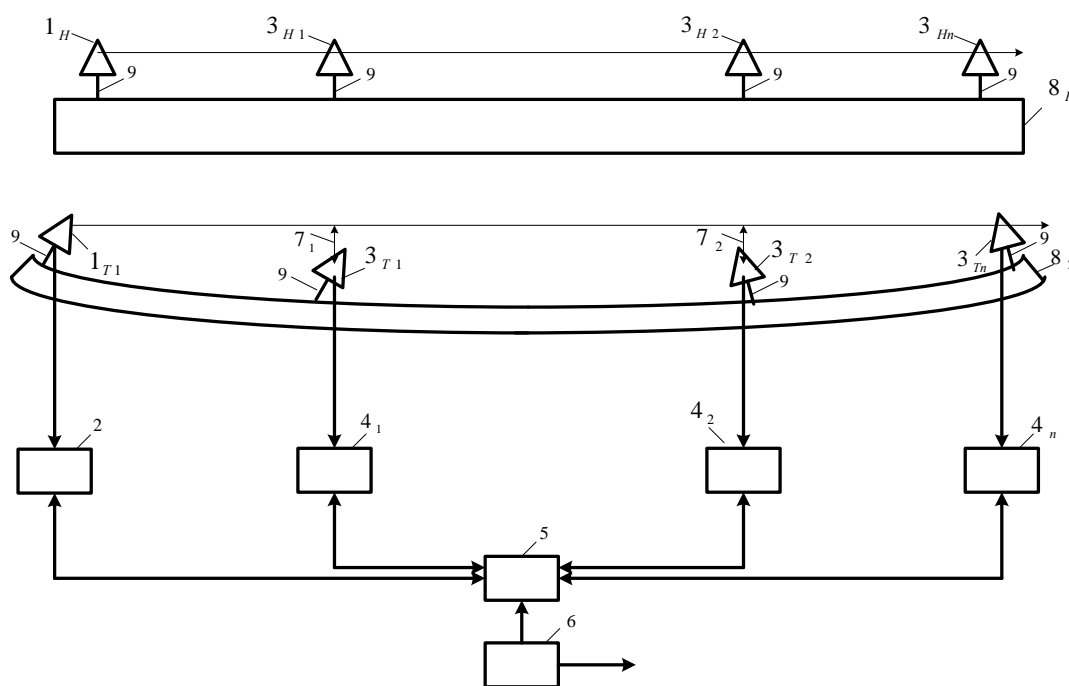


Рисунок 3 – Принципиальная схема системы измерения деформаций корпуса судна

Суть работы системы измерения деформаций корпуса судна видна из чертежа, где

1– приемная антенна сигналов ГНСС базового приемника (индекс «**H**» относится к начальному положению антенны, индекс «**T**» – к текущему положению антенны);

2 – базовый приемник;

$3_1 - 3_n$ – приемные антенны сигналов ГНСС дополнительных приемников (индекс « H » относится к начальному положению антенны, индекс « T » – к текущему положению антенны);

$4_1 - 4_n$ – дополнительные приемники;

5 – система обмена данными между приемниками и процессором Блока приемовычислительного;

6 – процессор Блока приемовычислительного для обработки фазовых измерений от всех приемников;

$7_1 - 7_{n-1}$ – линейные значения стрелы прогиба/перегиба;

$8_H - 8_T$ – корпус судна в начальном и текущем состояниях;

9 – устройство неподвижного крепления приемной спутниковой антенны к корпусу судна.

Обмен данными между приемниками, а также выдача данных из приемников в процессор Блока приемовычислительного производится с помощью системы обмена данными (5).

При получении из дополнительных приемников (4) данных о взаимном положении антенн относительно антенны базового приемника, в процессоре (6) вычисляются значения величин прогиба/перегиба корпуса судна, как значения отстояний (7) внутренних приемных антенн дополнительных приемников (3) от линии, соединяющей текущие положения крайних (носовой и кормовой) приемных антенн (1) и (3_n).

Получая точности измерения отстояния антенн – $\sigma\Delta = 20 - 30$ мм, оценка величин прогиба/перегиба корпуса судна вполне корректна, при значениях стрел прогиба/перегиба, которые для корпусов судов ледового плавания составляют от 100 до 300 мм, а для больших длинномерных судов могут доходить до 500 мм.

Измеряя величину $\Delta(\tau_1 - \tau_{n-1})$ – отстояния внутренних антенн приемников от линии соединяющей текущие положения крайних (носовой и кормовой) приемных антенн, в режиме реального времени, получаем на выходе из процессора Блока приемовычислительного, реализующего алгоритм быстрого преобразования Фурье, следующее:

- амплитуду низкочастотных колебаний – **A**;
- частоту вынужденных низкочастотных колебаний – **F_{внч}**, которая при сравнении с частотой собственных колебаний судна – **F₀** позволяет предотвратить резонансные явления, путем изменения курса и/или скорости судна относительно волнения.

Данная технология может быть применена:

- при испытаниях вновь построенных судов – для сопоставления полученных результатов с проектными расчетами и, при необходимости, внесения изменений в конструкции корпусов последующих судов данной серии;
- при проведении погрузки/разгрузки судов – для исключения избыточных нагрузок на корпус судна вследствие неправильности распределения грузов в пространстве и времени;
- при плавании в штормовых и в сложных ледовых условиях – для выдачи рекомендаций судоводителю по изменению курса и/или скорости относительно волны, льда и для исключения резонансных колебаний корпуса судна.

1.6 Технология для определения относительного положения точек приема массива информации от навигационных космических аппаратов (НКА), основанная на фазовых измерениях радиосигналов ГНСС разработана и реализована в аппаратном комплексе и программном обеспечении к нему, принадлежащих ООО «3Д спутниковая навигация».

Аналоги аппаратуры и программное обеспечение реализованы и успешно функционируют:

- в судовом спутниковом компасе с тремя и четырьмя антеннами;
- в системах мониторинга деформаций и смещений объектов инфраструктуры автомобильных дорог;
- в системах контроля деформаций и смещений противооползневых сооружений;
- в системе обеспечения швартовки к необорудованному побережью.

В этих проектах были внедрены: приемный модуль МПГНСС-2 (двухчастотный) и приемовычислительный модуль МПГНСС-4С (одночастотный) ГНСС ГЛОНАСС/GPS, разработки и изготовления ООО «3Д спутниковая навигация».

2 Определение типов измерительных каналов системы измерения деформаций корпуса судна/морского сооружения на основе ГНСС ГЛОНАСС/GPS

2.1 Каждый измерительный канал системы измерения деформаций состоит из антенны, служащей для приема радиосигналов ГНСС ГЛОНАСС/GPS, модуля приемовычислительного – для их обработки и интерфейсного кабеля обмена данными.

2.2 При построении системы измерения деформаций корпуса судна/морского сооружения может быть использован «Модуль приемный глобальных навигационных спутниковых систем ГЛОНАСС и GPS L1/L2 двухчастотный» (МПГНСС-2) ДВЕК.461513.002 и ПО к нему, разработанные в ООО «3Д спутниковая навигация».

Измерительный канал системы, в этом случае, будет состоять из двухчастотной приемной антенны, МПГНСС-2 и интерфейсного кабеля

обмена данными (см. рисунок 4).

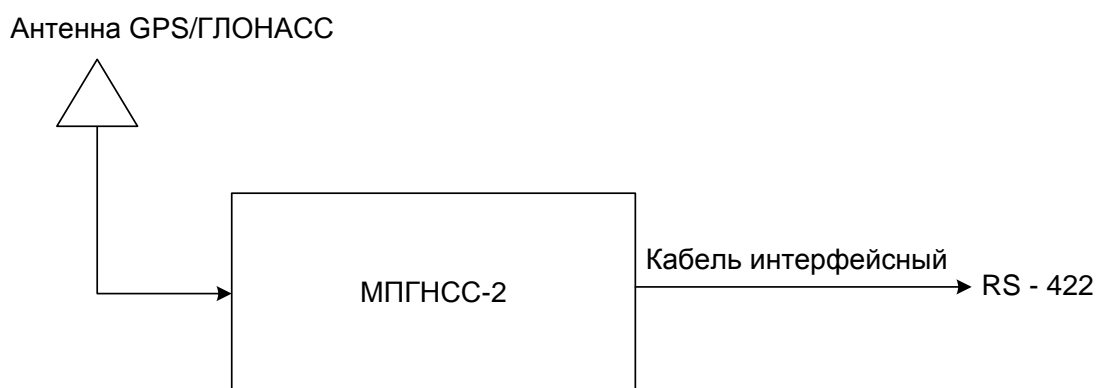


Рисунок 4 – Измерительный канал системы измерения деформаций корпуса судна/морского сооружения

В измерительном канале радиосигналы ГНСС от приемной антенны (1) или ($3_1 - 3_n$) поступают на вход соответствующего приемника МПГНСС-2, а данные кодовых и фазовых измерений от приемников МПГНСС-2 через систему обмена данными (5) по интерфейсному кабелю по стандартному протоколу RS-422 поступают в процессор (6) (см. рисунок 3).

Приемный модуль МПГНСС-2 представлен на рисунке 5, а двухчастотная приемная антенна на рисунке 6.



Рисунок 5 – Модуль МПГНСС-2



Рисунок 6 – Приемная антенна сигналов ГНСС (МПГНСС-2, МПГНСС-4)

3 Определение количества точек наблюдения системы измерения деформаций корпуса судна на основе ГНСС ГЛОНАСС/GPS

3.1 Каждый измерительный канал системы имеет одну точку наблюдения, которая совпадает с фазовым центром двухчастотной приемной антенны, жестко закрепленной на корпусе судна.

3.2 Количество точек наблюдения N – антенн измерительных каналов, определяется числом точек на корпусе судна, для которых производятся измерения стрелы прогиба/перегиба. Минимальное число $N_{\min} = 4$, в том числе две точки, в которых рассчитываются величины $\Delta(\gamma_1 - \gamma_{n-1})$ – отстояния антенн приемников от линии соединяющей текущие положения крайних (носовой и кормовой) приемных антенн ГНСС. Необходимое число точек наблюдения величины $\Delta(\gamma_1 - \gamma_{n-1}) - N\Delta$ рассчитывается по формуле

$$N\Delta = N - 2, \quad (1)$$

где N – общее число точек наблюдения, в которых производится замер радиосигналов от НКА с кодовыми и фазовыми параметрами.

3.3 Схема размещения точек наблюдения системы измерения деформаций корпуса судна приведена на рисунке 7.

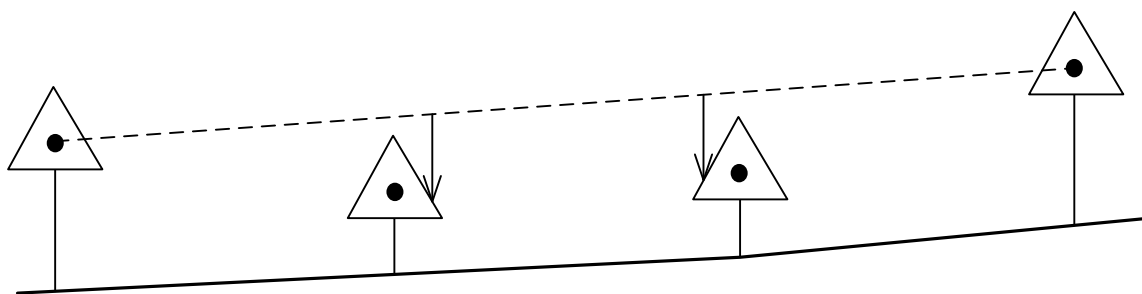


Рисунок 7 – Схема размещения точек наблюдения системы измерения деформаций корпуса судна

Число точек наблюдения на судне для измерения деформаций корпуса зависит от конструктивных особенностей корпуса: его протяженности и формы; достаточной общей и местной прочности; герметичности и размеров люков трюмов; достаточности высоты надводного борта; отсутствия выступающих частей за бортом; расположения механизмов и надстроек.

Пример расположения точек наблюдения приведен на рисунке 8.



Рисунок 8 – Расположение двух частотных антенн системы измерения деформаций корпуса судна

Число точек наблюдения и конкретное их местоположение для каждого проекта судна определяется совокупностью множества факторов: конструктивными особенностями корпуса судна; расположением антенн на одной линии – близкой к диаметральной плоскости судна; учетом не затененности и уменьшения многолучевости каждой конкретной приемной антенны.

4 Определение величин, контролируемых в точке, и требуемых точностей контроля в системах измерения деформаций корпуса судна на основе ГНСС ГЛОНАСС/GPS

4.1 В точке наблюдения системы измерения деформаций корпуса судна замеряются линейные значения отстояний (Δ) внутренних антенн дополнительных приемников от линии, соединяющей текущие положения крайних (носовой и кормовой) приемных антенн.

Технологии ГНСС ГЛОНАСС и GPS в режиме RTK позволяют производить замеры и расчеты линейных значений отстояний в вертикальной – Δ_z (линейный изгиб) и горизонтальной – Δ_p (поперечный изгиб) плоскостях (см. рисунок 9).



Рисунок 9 – Линейные величины отстояния в вертикальной – Δ_z и горизонтальной – Δ_p плоскостях

Точностные характеристики линейных значений отстояний внутренних измерительных точек от линии, соединяющей текущие положения крайних измерительных точек, определяются возможностями технологии ГНСС ГЛОНАСС и GPS в режиме RTK.

Известно, что среднеквадратическая погрешность (СКП) измерения единичной разности высот двух антенн (σ_z) в режиме RTK составляет от 20 до 30 мм, а СКП измерения единичных разностей в плоскости двух антенн (σ_p) в режиме RTK составляет от 10 до 20 мм.

Тогда СКП единичной разности высот линии, проходящей через крайние антенны и внутренние антенны (σ_Δ) не превышает значения

$$\sigma_\Delta \leq \sqrt{2}\sigma_z . \quad (2)$$

Таким образом, можно использовать процедуру осреднения единичных значений разностей высот на интервале до 0,5 с, что соответствует числу отсчетов от 5 до 25 по данным RTK при частоте измерений $F_{\text{и}} = 1-50$ Гц.

При использовании двухчастотной антенны L1/L2 и двухчастотного приемника МПГНСС-2 в каждой измерительной точке в режиме RTK с частотой измерений $F_{\text{и}} = 1-50$ Гц получаем СКП измеренных величин:

- в вертикальной плоскости $\sigma_{\Delta_z} = 30$ мм;
- в горизонтальной плоскости $\sigma_{\Delta_p} = 20$ мм

5 Определение структуры совокупности измерительных каналов и измерительной системы в системах измерения деформаций корпуса судна на основе ГНСС ГЛОНАСС/GPS

5.1 Система измерения деформаций корпуса судна представляет собой совокупность измерительных каналов и измерительной системы на основе ГНСС ГЛОНАСС/GPS, структура которой представлена на рисунке 10.

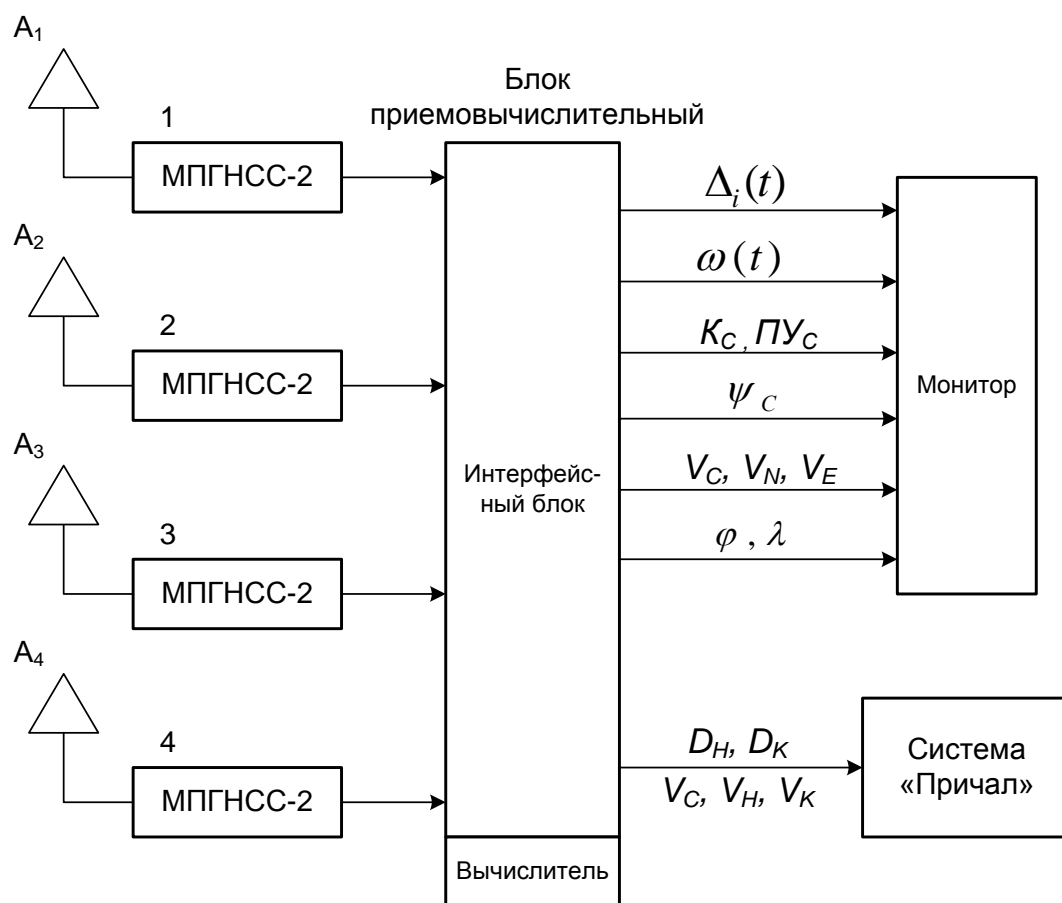


Рисунок 10 – Структура системы измерения деформаций корпуса судна на основе технологии ГНСС ГЛОНАСС/GPS

Каждый измерительный канал системы, состоящий из двухчастотной антенны – A_i , двухчастотного приемника – МПГНСС-2 и высокочастотного кабеля, производит прием кодовой и фазовой радиоинформации от НКА и решение задач в следующей последовательности:

- формируются разности фазовых измерений между дополнительными приемниками МПГНСС-2 (2-4) и базовым приемником МПГНСС-2 (1);
- разрешается неоднозначность фазовых измерений в режиме кинематики реального времени (RTK) в движении (OTF);
- определяются текущие прямоугольные координаты антенн $A_2 - A_4$ дополнительных приемников МПГНСС-2 (2-4) относительно антенны A_1 в топоцентрической системе координат.

Результаты решения задач в измерительных каналах транслируются по интерфейсным кабелям в Блок приемовычислительный, где производится решение задач в следующей последовательности:

- вычисляются текущие прямоугольные координаты приемных антенн $A_2 - A_4$ относительно приемной антенны A_1 в топоцентрической системе координат;

- вычисляются текущие параметры линии, проходящей через точки A_1 и A_4 ;

- вычисляются значения величины прогиба/перегиба корпуса судна, как значения отстояний точек измерения A_2 и A_3 относительно линии, проходящей через точки A_1 и A_4 .

В начальном положении антенн (при отсутствии деформации корпуса судна), все антенны размещаются приблизительно на одной прямой, при этом значение величины стрелы прогиба/перегиба для всех измерительных точек будут равны нулю ($\Delta_i=0$).

В процессе плавания под влиянием внешних факторов происходит деформация корпуса судна и, соответственно, изменяется взаимное положение приемных антенн, неподвижно прикрепленных к корпусу судна. При этом полученные в Блоке приемовычислительном расчетные значения величины стрелы прогиба/перегиба для приемных антенн A_2 и A_3 не будут равны нулю.

5.2 Расчетные значения величины стрелы прогиба/перегиба для приемных антенн A_2 и A_3 транслируются в автоматизированное рабочее место (АРМ) судоводителя или в интегрированную систему управления судном, где преобразовываются и наглядно демонстрируются на мониторе, в виде:

- сглаженных текущих значений стрел прогиба/перегиба в цифровой и графической форме;

– сигналов оповещения и тревог, предупреждающих оператора о превышении текущего значения стрелы прогиба/перегиба корпуса, относительно заданных предельных значений;

– архивов результатов документирования измерений в течение всего времени работы системы.

5.3 На выходе измерительной системы при обработке всей совокупности спутниковой информации и решении задач в приемнике МПГНСС-2 и в Блоке приемовычислительном, будет выдаваться обширный массив параметров полезных для безопасного судовождения, таких как:

– линейные величины интегральной деформации корпуса судна – $\Delta i(t)$, с точностью – ± 30 мм;

– угловая скорость судна – $\omega(t)$, с точностью – $\pm 0,03^\circ/\text{с}$;

– курс судна – K , с точностью – $\pm 0,01^\circ$ и лучше;

– путевой угол судна – $ПУ$, с точностью – $\pm 0,5^\circ$;

– дифферент судна – $\psi(t)$, с точностью – $\pm 0,02^\circ$ и лучше;

– скорость судна – V и ее составляющие – V_N и V_E , с точностью – $\pm 0,1$ м/с;

– навигационные параметры: широта – φ и долгота – λ , с точностью – $\pm 0,2''$;

– параметры для решения задач швартовки к необорудованному побережью в системе автоматизации швартовных операций «Причал».

Весь этот массив рассчитанных параметров транслируется в АРМ судоводителя или в интегрированную систему управления судном для анализа и принятия решения судоводителем по вопросам безопасности.

Конструктивно оборудование на основе ГНСС ГЛОНАСС/GPS выполнено таким образом, чтобы при использовании на судах с интегрированной системой управления судном элементы этого оборудования без доработки могли быть интегрированы в аппаратуру системы управления судном.

Такое построение оборудования системы на основе ГНСС должно позволить при варианте использования в составе интегрированной системы значительно сократить его объем и стоимость за счет исключения из спутникового оборудования средств обеспечения электропитанием, средств отображения и управления, функции которых будут возложены на аппаратуру интегрированной системы управления судном.

Предлагаемое решение позволяет объединить средства спутниковой навигации, средства автоматизации, информационные средства и системы управления судов ледового плавания различного назначения (грузовых, танкеров, газозовозов и т.п.), для повышения степени автоматизации функций системы управления деятельностью судна в наиболее опасных условиях – при сильном шторме и больших ледовых нагрузках.

6 Особенности мониторинга глобальных деформаций морских сооружений на основе ГНСС ГЛОНАСС/GPS

6.1 Особенности построения системы мониторинга глобальных деформаций морских сооружений на основе ГНСС ГЛОНАСС/GPS

6.1.1 Морские сооружения ледового класса являются сложными инженерными и опасными производственными объектами, поэтому мониторинг их технического состояния от воздействия внешних факторов – это одна из главных задач эксплуатационной и экологической безопасности.

Система мониторинга глобальных деформаций морского сооружения, выполненная на основе ГНСС ГЛОНАСС/GPS, позволит быстро реагировать на негативные изменения от воздействия внешних факторов, своевременно

принимать меры для предотвращения аварийных ситуаций и ,как следствие – снижение возможных экономических потерь.

Принцип измерений трехмерных интегральных деформаций корпуса морского сооружения состоит в обработке данных о фазовых сдвигах радиосигналов, принимаемых приемниками ГЛОНАСС/GPS, на антенны, размещенные в определенных местах платформы. В результате обработки данных о фазовых сдвигах определяется взаимное расположение спутниковых антенн с сантиметровой точностью, в режиме реального времени и с учетом результатов постобработки.

Особенностью системы мониторинга глобальных деформаций морского сооружения, выполненной на основе ГНСС ГЛОНАСС/GPS, является то, что эта система должна улавливать не только деформации несущей конструкции морского сооружения но и его подвижки относительно грунта. А это предъявляет особые требования к точности выработки линейных горизонтальных и вертикальных смещений каждой приемной антенны относительно базовой, а также к точности определения координат каждой антенны в системе ITRF-2008 (Международной земной системе отсчета).

6.1.2 Предлагаемая система мониторинга глобальных деформаций морского сооружения, выполненная на основе ГНСС ГЛОНАСС/GPS, предусматривает развертывание двух подсистем:

- бортовой подсистемы – для приема, обработки и обсчета всего массива информации получаемой от НКА и береговой подсистемы, а также для отображения и документирования результатов мониторинга глобальных деформаций и подвижек морского сооружения относительно грунта;

- береговой подсистемы – для обработки параметров спутниковых наблюдений получаемых от бортовой подсистемы с использованием уточненных элементов орбит НКА, предоставляемых службой IGS (International GNSS Service), привязки всех параметров к Мировой земной

системе отсчета – ITRF-2008 и выдачи точных координат каждой антенны в бортовую подсистему.

Построение системы измерения глобальных деформаций морского сооружения на основе технологии ГНСС ГЛОНАСС/GPS, представлено на рисунке 11.

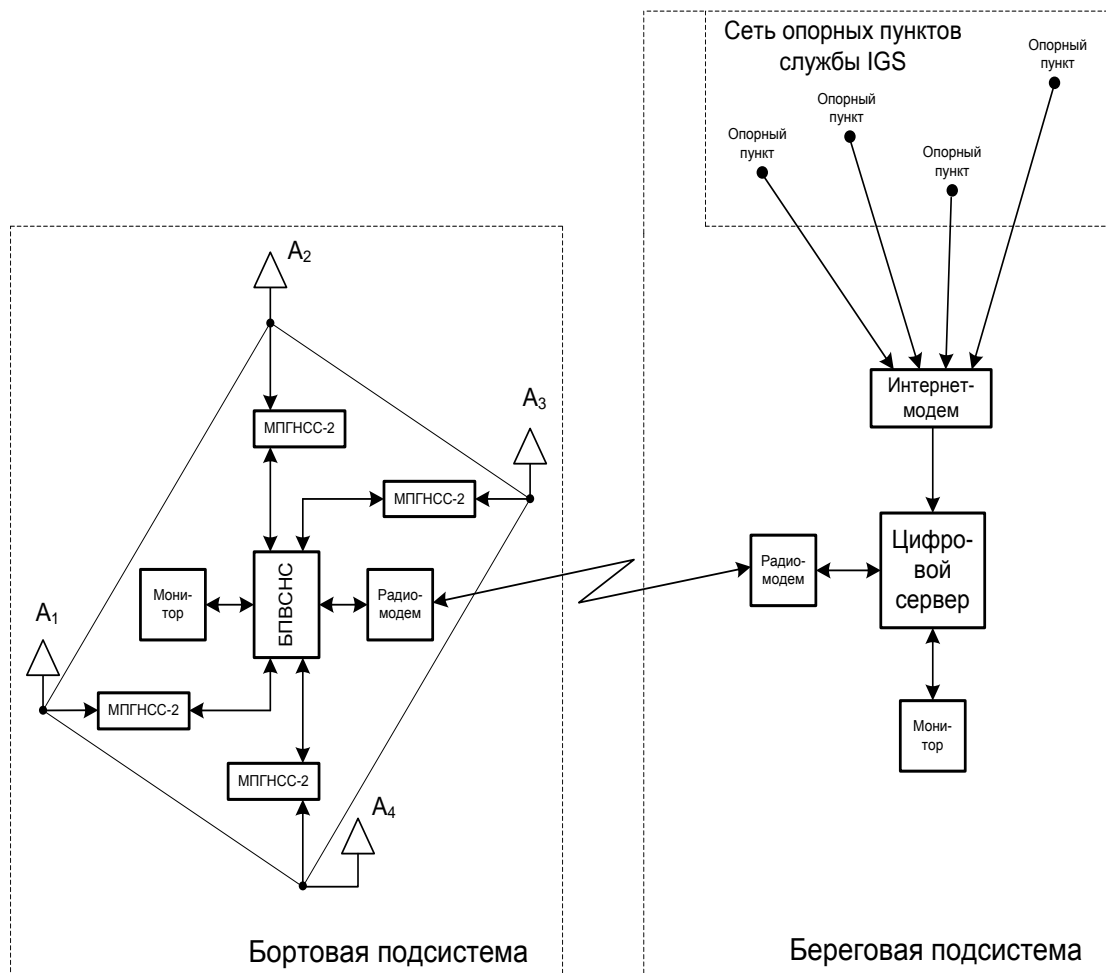


Рисунок 11 – Система измерения глобальных деформаций морского сооружения на основе технологии ГНСС ГЛОНАСС/GPS

Связь между подсистемами может осуществляться по выделенному радиоканалу в общей системе связи «Берег – Морское сооружение» или через специализированные радиомодемы системы мониторинга глобальных деформаций морского сооружения.

6.2 Бортовая подсистема системы мониторинга глобальных деформаций морского сооружения, выполненная на основе ГНСС ГЛОНАСС/GPS

6.2.1 Бортовая подсистема системы мониторинга глобальных деформаций морского сооружения, выполненная на основе ГНСС ГЛОНАСС/GPS (далее – бортовая подсистема) предусматривает размещение по периметру морского сооружения четырех двухчастотных спутниковых приемных антенн (см. рисунок 12), каждая из которых работает с двухчастотным модулем приемным – МПГНСС-2. Из модулей приемных данные кодовых и фазовых измерений радиосигналов ГНСС поступают в Блок приемоычислительный спутниковой навигационной системы (БПВСНС).



Рисунок 12 – Расположение двухчастотных спутниковых антенн системы измерения деформаций морского сооружения

Каждая антенна жестко прикрепляется к несущей конструкции морского сооружения в назначенной точке наблюдения (см. рисунок 13), местоположение которой определяется совокупностью множества факторов: конструктивными особенностями корпуса сооружения; необходимостью расположения антенн по периметру, примерно на равных удалениях друг от друга, а также необходимостью учета не затененности и наименьшей многолучевости для каждой конкретной приемной антенны.

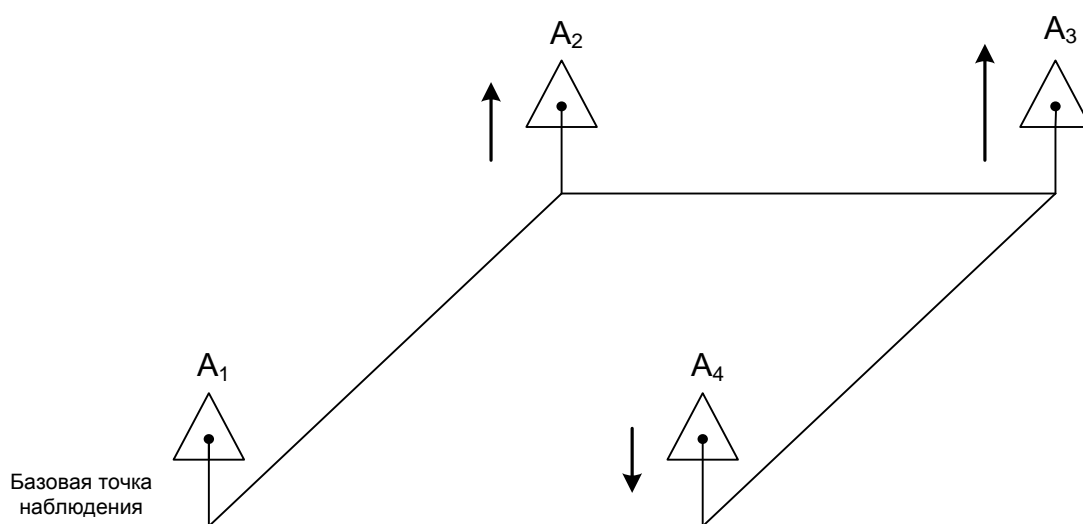


Рисунок 13 – Схема размещения точек наблюдения системы измерения деформаций морского сооружения

Модуль МПГНСС-2, устанавливаемый вблизи точки наблюдения, в совокупности с антенной и кабелями связи, образуют измерительный канал (см. рисунок 4). В каждом измерительном канале радиосигналы ГНСС от приемной антенны поступают на вход соответствующего приемника МПГНСС-2, а данные кодовых и фазовых измерений от МПГНСС-2 по интерфейсному кабелю по стандартному протоколу RS-422 поступают в блок БПВСНС.

Блок приемовычислительный, получая данные кодовых и фазовых измерений от МПГНСС-2 через интерфейсный блок, производит вычисления по каждой точке наблюдения в режиме RTK, определяя пространственные

координаты каждой точки наблюдения с точностью до нескольких сантиметров.

6.2.2 Бортовая подсистема обеспечивает непрерывное, автоматическое определение смещений точек наблюдения, при этом одна из точек наблюдения назначается в качестве базовой и относительно ее пространственного положения вычисляются смещения остальных (вспомогательных) точек наблюдения. Пространственные смещения, по высоте и в плоскости, каждой вспомогательной точки наблюдения относительно базовой точки наблюдения позволяют контролировать геометрию несущей конструкции морского сооружения и его пространственное положение.

Технологии ГНСС ГЛОНАСС и GPS в режиме RTK позволяют производить замеры и расчеты линейных значений относительных смещений в вертикальной плоскости с точностью – $\sigma\Delta_z = 100$ мм и в горизонтальной плоскости – $\sigma\Delta_p = 50$ мм. Сложная конструкция надстроек и наличие громоздких механизмов на палубе морского сооружения создают определенные помехи в местах установки спутниковых антенн. Поэтому погрешности измеренных смещений точек наблюдений, в условиях многолучевости, могут достигать – $\sigma\Delta = 400$ мм.

Однако, считая морское сооружение устойчивой и относительно стабильной конструкцией, осредняя вычисленные значения координат и приняв тренд смещений точек наблюдения во времени, близким к прямой линии, в результате постобработки параметров за сутки, можем получить точности координат точек наблюдения: $\sigma\Delta_z = 70$ мм и $\sigma\Delta_p = 50$ мм.

Для повышения точности координат точек наблюдения рассчитанных в БПВСНС, используются точные параметры орбит (эфемерид) НКА ГНСС, которые поступают из береговой подсистемы системы мониторинга деформаций морского сооружения.

После окончательных расчетов, предельные точности координат точек наблюдения составят: $\sigma\Delta_z = 50$ мм и $\sigma\Delta_p = 30$ мм.

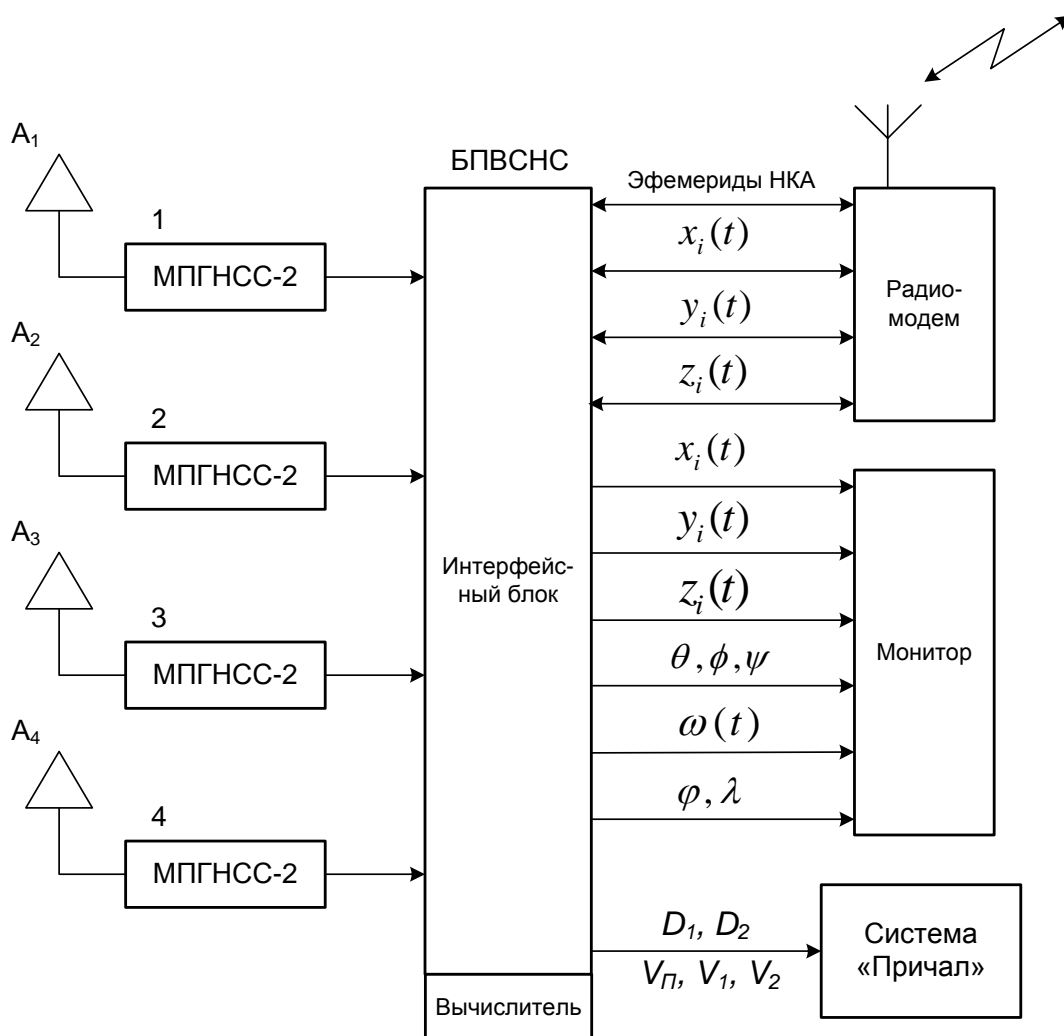


Рисунок 14 – Структура бортовой подсистемы измерения деформаций морского сооружения на основе ГНСС ГЛОНАСС/GPS

На рисунке 14 видим, что в бортовой подсистеме циркулируют параметры измеренных и уточненных эфемерид НКА, рассчитанные текущие и уточненные координаты точек наблюдения в Мировой земной системе отсчета – ITRF-2008 ($x_i(t), y_i(t), z_i(t)$). Дополнительно, для информирования руководящего состава, система может выдавать углы

кренов и разворотов морского сооружения (θ , ϕ , ψ и $\omega(t)$), а также дистанции и скорости сближающихся с морским сооружением плавающих и летающих объектов, если на них установлена аппаратура системы «Причал».

По разности координат точек наблюдения, полученных с высокой точностью, оцениваются пространственные деформации несущей конструкции морского сооружения – изгибы, сдвиги, кручения, которые возникают под воздействием нагрузок, в том числе и от ледовых полей и айсбергов.

6.3 Береговая подсистема мониторинга глобальных деформаций морского сооружения

6.3.1 Береговая подсистема системы мониторинга глобальных деформаций морского сооружения, выполненная на основе ГНСС ГЛОНАСС/GPS (далее – береговая подсистема) представляет собой: цифровой сервер, монитор, средства связи с бортовой подсистемой и со специализированными службами через сеть Интернет.

Цифровой сервер должен использовать специализированный web-сервис, аналогичный по функциям Leica CrossCheck, предложенный и реализованный в 2012 году НАВГЕОКОМ (Россия) и Lieca Geosystems (Швейцария). В нем используется программное обеспечение Bernese GPS Software и алгоритмы обработки данных ГНСС для получения высокоточных координат при сверхдлинных базовых линиях. Это программное обеспечение отвечает стандартам качества в области высокоточной спутниковой геодезии, позволяет исключить ошибки и устранить неопределенности в обработке базовых линий, чем достигается высокая точность расчетов.

В сервере параметры спутниковых наблюдений обрабатываются с использованием уточненных элементов орбит НКА и ориентации полюсов, предоставляемых службой IGS в Международной земной системе отсчета ITRF-2008. Элементы орбит НКА и ориентация полюсов вычисляются

постоянно действующими станциями службы IGS на опорных пунктах, места которых тоже постоянно уточняются в системе отсчета ITRF-2008, поскольку ITRF-2008 задана как неподвижная система отсчета.

Служба IGS предоставляет элементы орбит НКА высокой точности с задержкой в 12 – 18 дней, а также в более короткие сроки, но с менее высокой точностью. В сервисе используются средние периоды наблюдений, гарантирующие согласованность между координатами станций на опорных пунктах и точными элементами орбит НКА.

Также в сервере производится абсолютная калибровка антенн приемников ГНСС в системе отсчета ITRF-2008, с учетом положения фазового центра антенн и влияния систематических ошибок, зависящих от угла возвышения, азимута и частоты спутникового сигнала. Таким образом, определение координат точек наблюдения производится в системе отсчета ITRF-2008 и это необходимо для применения единой координатной отсчетной основы, обеспечивающей высокую точность и единство измерений.

В обработку будут приниматься базовые линии между станциями службы IGS и точками наблюдения длиной менее 5000 км (см. рисунок 15).

Основными критериями выбора опорных пунктов являются:

- минимальное расстояние до морского сооружения;
- постоянное наличие данных от станций службы IGS;
- известные координаты в системе отсчета ITRF-2008.

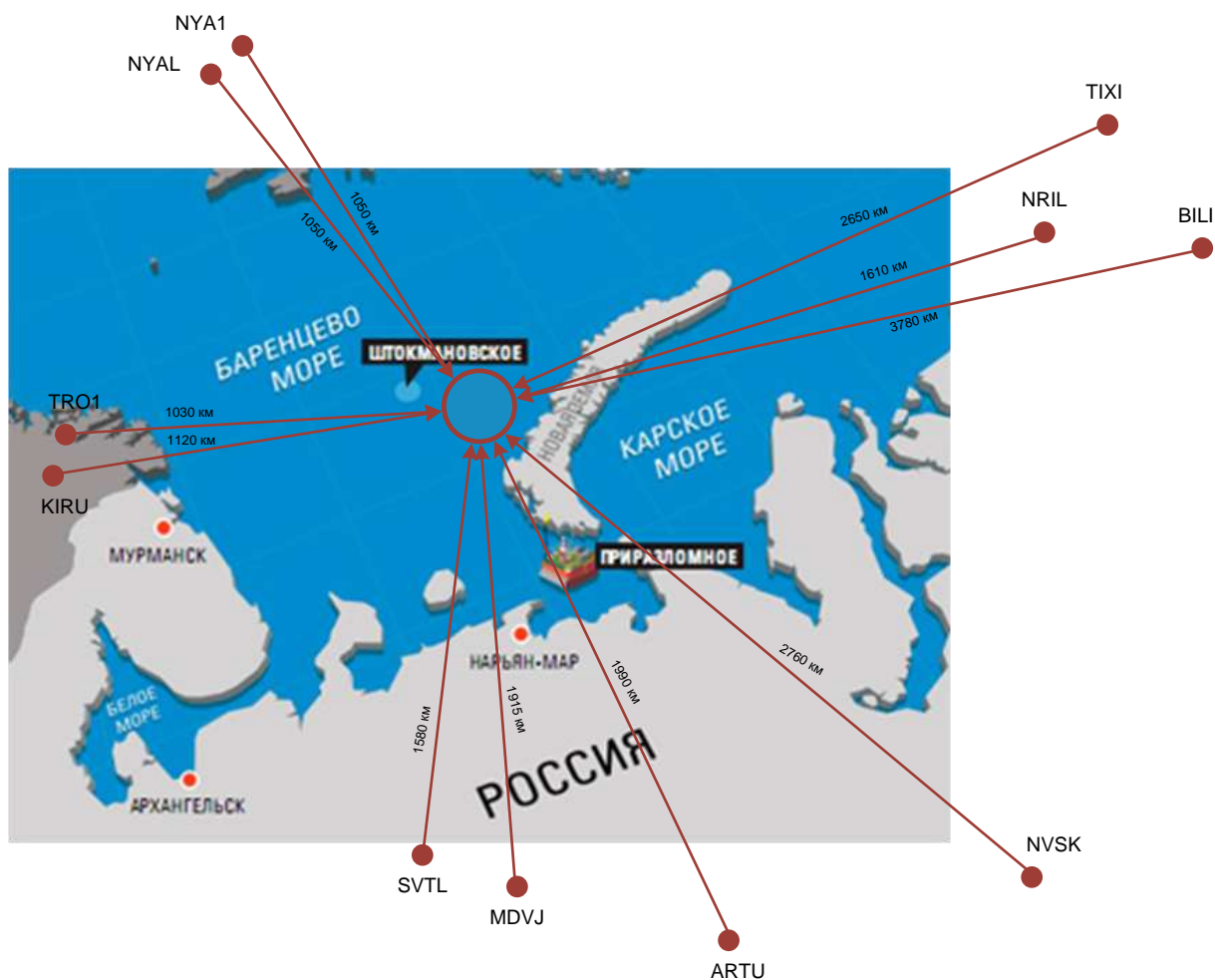


Рисунок 15 – Морское сооружение в районе добычи и назначенные опорные пункты ITRF со станциями службы IGS

Для обработки параметров спутниковых наблюдений, в качестве опорных пунктов, могут использоваться станции службы IGS расположенные в северной части России и в Скандинавии: SCOR; HOFN; NYA1; NYAL; TRO1; KIRU; METS; RIDA; SVTL; MDVJ; ARTU; NVSK; NRIL; TIXI; BILI.

В целях исключения влияния тектонических смещений на координаты станций службы IGS и, как следствие, на результаты мониторинга глобальных деформаций морского сооружения, обработка измеренных

спутниковых параметров должна учитывать модель тектонического движения земной коры.

Первоначальная обработка всего массива информации наблюдений в бортовой подсистеме с коррекцией от береговой подсистемы позволяет выявлять относительные смещения точек наблюдения с точностью $\sigma\Delta = 5$ мм в трех плоскостях с вероятностью – более 0,95, в режиме реального времени.

Вычисления в режиме постобработки с интервалом от 1 до 4 часов, полученные в течение суток, позволяют определять положение каждой точки наблюдения в плане (по осям x и y) и по высоте (по оси z), в единой системе координат (ITRF-2008), с точностью до нескольких миллиметров, с вероятностью – более 0,95.

Вычисления трехмерных координат точек наблюдения на определенный момент времени, отображение их в виде графиков смещений по каждой оси координат, позволяют выявлять: осадки, смещения и сдвиги, растяжения и сжатия, кручения и изгибы, возникающие в связи с изменением геометрии конструкции корпуса и пространственного положения морского сооружения.

Таким образом, система мониторинга глобальных деформаций морского сооружения, выполненная на основе ГНСС ГЛОНАСС/GPS, позволяет осуществлять контроль деформаций несущей конструкции корпуса морского сооружения и его подвижек относительно грунта, возникающих под воздействием сил и нагрузок, изменяющихся во времени по величине и направлению.

Основными преимуществами предлагаемой системы мониторинга глобальных деформаций морского сооружения на основе ГНСС ГЛОНАСС/GPS являются следующие факторы:

– мониторинг выполняется дистанционно, в автоматическом режиме, непрерывно и круглосуточно;

– система не требует сложной калибровки и настройки, при этом, как следствие, не требуется специальное обучение персонала для поддержания ее в работоспособном состоянии;

– система выявляет смещения точек наблюдения с предельной точностью (до 5 мм) в трех плоскостях, что позволяет, при сравнении значений измеренных величин с, установленными проектом, предельными значениями величин, оценить техническое состояние морского сооружения с высокой вероятностью;

– мониторинг деформаций, с помощью предложенной системы, обеспечит высокую надежность и эффективность контроля изменений конфигурации корпуса морского сооружения и его смещений относительно грунта, для осуществления его безопасной эксплуатации.

7 Разработка алгоритмов обработки данных с выходов измерительных каналов и измерительных систем на основе ГНСС ГЛОНАСС/GPS

7.1 Величины значений стрелы прогиба/перегиба могут быть найдены из формул:

$$\Delta_{i \text{ верт}} = d_i \cos \theta, \quad (3)$$

$$\Delta_{i \text{ гориз}} = d_i \sin \theta, \quad (4)$$

где d – расстояние между точкой i -й антенны и прямой, соединяющей кормовую и носовую приемные антенны ГНСС;

θ – угол крена судна.

Мы можем использовать векторное произведение для вычисления дистанции от точки P до прямой L , заданной точками P_0 и P_1 .

Следует отметить тот факт, что величина векторного произведения двух трехмерных векторов равна площади параллелограмма, построенного на них.

Однако эта площадь также равна произведению основания на высоту параллелограмма, а длина высоты - искомая дистанция $d(P, L)$. Пусть $\mathbf{v}_L = \mathbf{P}_0\mathbf{P}_1 = (\mathbf{P}_1 - \mathbf{P}_0)$ и $\mathbf{w} = \mathbf{P}_0\mathbf{P} = (\mathbf{P} - \mathbf{P}_0)$ как показано на рисунке 16.

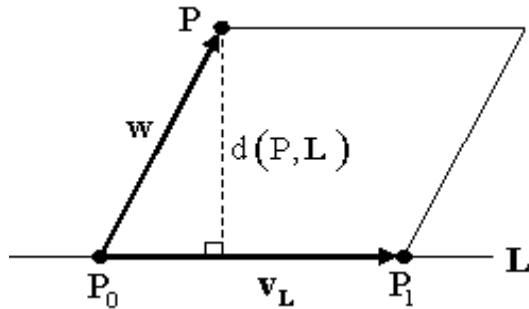


Рисунок 16

Тогда $|\mathbf{v}_L \times \mathbf{w}| = \text{Area}(\text{parallelogram}(\mathbf{v}_L, \mathbf{w})) = |\mathbf{v}_L| d(P, L)$, что дает простую формулу

$$d(P, L) = \frac{|\mathbf{v}_L \times \mathbf{w}|}{|\mathbf{v}_L|} = |\mathbf{u}_L \times \mathbf{w}|, \quad (5)$$

где $\mathbf{u}_L = \mathbf{v}_L / |\mathbf{v}_L|$ – единичный вектор направления L .

Если мы хотим вычислить расстояние от большого числа точек до фиксированной прямой, то наиболее рациональным будет предварительно вычислить \mathbf{u}_L .

7.2 Значения Δ_i могут измеряться с частотой до 50 Гц и накапливаться в компьютере для дальнейшей обработки, как показано в п. 5.2.