

А. В. Андропов

ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ ВНУТРИТРУБНЫХ СНАРЯДОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДАННЫХ ГЛОНАСС/GPS

Рассмотрено комплексирование данных бесплатформенной инерциальной навигационной системы внутритрубного снаряда и координатных данных пунктов коррекции (маркеров), оснащенных приемниками ГЛОНАСС/GPS, с использованием алгоритмов фильтрации и сглаживания.

Реализуемые в настоящее время крупные проекты по строительству магистральных трубопроводов (МТ), старение старых, повышение объемов добычи и транспортировки углеводородного сырья на фоне ужесточающихся требований по безопасности и экологичности заставляют по-новому взглянуть на аспекты мониторинга и диагностики состояния магистральных трубопроводов. Получившая в последнее время широкое распространение технология внутритрубной неразрушающей дефектоскопии с использованием автономных внутритрубных инспекционных снарядов (ВИС) позволила многократно повысить надежность и безаварийность магистральных трубопроводов [1]. При этом наряду с высокими достижениями в области внутритрубной дефектоскопии имеются очевидные проблемы навигационного обеспечения данных измерений и контроля пространственного положения подземных и подводных трубопроводов. В частности, должны быть решены следующие задачи:

- определены с высокой точностью географических координат дефекты ВИС, при этом вскрытие трубопровода должно быть минимальным;
- определены с высокой точностью географических координат траектории ВИС для контроля пространственного положения МТ.

Контроль пространственного положения МТ с целью своевременного обнаружения оползней, провалов, пучинистостей и других трубопроводными операторами России в настоящее время не проводится из-за отсутствия эффективных методик и аппаратуры. В середине 90-х гг. развитие технологий инерциальной навигации позволило создавать ВИС на борту с бесплатформенной инерциальной навигационной системы (БИНС). Однако основная задача системы – ориентации снаряда – высокая точность – не решается из-за низкой точности автономных БИНС. Значения основных инструментальных среднеквадратиче-

ских погрешностей некоторых серийно выпускаемых инерциальных навигационных систем (ИНС) (полуаналитической ИНС «Маршрут», выполненной на поплавковых гироскопах, бесплатформенных «Lasernav», созданных на лазерных гироскопах, и «LITEF», в основу которых легли динамически настраиваемые гироскопы), приведены в табл. 1.

В таблице приводятся только значения m_T в связи с идентичностью характера влияния погрешностей β и погрешностей коэффициентов m_T , а также их примерного равенства $\beta \approx m_T$. Результаты расчета погрешностей координат, вызванных различными инструментальными погрешностями ИНС (табл. 1), с использованием аналитических выражений, полученных в [2], приведены в табл. 2. Расчет проведен на основе исходных данных:

- погрешности координат вызванные β и m_T рассчитаны для максимальной амплитуды угловых движений ВИС $A = 2$ град;
- интервал корреляции $\tau_{\text{кор}}$ смещения нуля акселерометра, характеризующий его изменчивость, принят равным 2 ч;
- временные интервалы движения T приняты 300 и 500 с, что при средней скорости движения ВИС $V \approx 4$ м/с соответствует длине траектории пройденных участков L_0 1,2 и 2 км, что соответствует типовому расстоянию между маркерными пунктами при внутритрубной диагностике;
- принимается непрямолинейность траектории т. е. $L_{\perp} = L = L_0/2$, где $L_{\perp}$ – длина траектории в поперечном направлении, L – длина траектории в продольном направлении.

Значение ошибки начальной выставки по курсу α_z и отвечающая ей погрешность начальной выставки по курсу соответствуют режиму двойного гирокомпасирования или использования промежуточной реперной точки (числитель) и режиму гирокомпасирования (знаменатель) (табл. 1, 2).

Таблица 1

Название ИНС	Значение основных инструментальных погрешностей (СКО)							
	$\Delta\omega$, град/ч	V_{ω} , град/ч	V_{δ} , угл. с	Δa , угл. с	V_a , угл. с	m_a , рад	m_T , рад	α_z , угл. с / угл. мин
«Маршрут»	$5 \cdot 10^{-3}$	–	1	0,5	2	10^{-5}	10^{-4}	30 / 2,5
«Lasernav»	$8 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-3}$	–	3	2	$5 \cdot 10^{-5}$	$5 \cdot 10^{-6}$	30 / 3,5
«LITEF»	$3 \cdot 10^{-2}$	$1 \cdot 10^{-2}$	–	10	1	10^{-4}	10^{-4}	30 / 13

Таблица 2

Инструментальная погрешность БИНС	Выражение для оценки влияния	Погрешность координат на времени T («Маршрут»/«Lasernav»/«LITEF»), см	
		$T = 300$ с	$T = 500$ с
Постоянная скорость ухода ($\Delta\omega$)	$\Delta\omega \frac{\tilde{g}T^3}{6}$	110 / 173 / 675	495 / 792 / 2969
Бел шумная скорость ухода гироскопа (V_ω)	$V_\omega \frac{\tilde{g}T^{5/2}}{\sqrt{20}}$	– / 3 / 16	– / 11 / 59
Бел шумная ошибка гироскопической следящей системы (V_δ)	$V_\delta \frac{\tilde{g}T^{3/2}}{\sqrt{3}}$	13 / – / –	50 / – / –
Погрешность установки β и масштаба m_r гироскопа	$m_r \tilde{g} \frac{T^3}{6}$ платформенная	40 / – / –	204 / – / –
	$m_r A \tilde{g} \frac{T^2}{2}$	– / 8 / 160	– / 21 / 428
Нестабильность смещения нуля акселерометра (Δa)	$\Delta a \frac{\tilde{g}T^{5/2}}{\tau_{\text{кор}}^{1/2} \sqrt{10}}$	16 / 94 / 312	56 / 340 / 1134
Бел шумная ошибка акселерометра (V_a)	$V_a \frac{\tilde{g}T^{3/2}}{\sqrt{3}}$	16	80
Погрешность масштаба акселерометра (m_a)	$m_a L$	1 / 3 / 6	1 / 5 / 10
Погрешность начальной выставки по курсу	$\alpha_z L_\perp$	$\frac{[15]}{[45/63/234]}$	$\frac{[50]}{[75/105/390]}$

Исходя из результатов расчетов (табл. 2), можно сделать вывод, что автономные ИНС без коррекции не позволяют достичь требуемой точности определения координат трубопровода. Известно, что при проектировании и эксплуатации магистральных трубопроводов большое значение имеет точность координатной информации, например в приложениях, касающихся измерений пространственного положения МТ и изменений пространственного положения, а также при проведении обследования состояний подводных участков МТ требуемая точность определения координат составляет $\pm 0,5$ м [3]. Для достижения такой точности и решения поставленных задач могут быть использованы спутниковые радионавигационные системы в комплексе с оборудованием ИНС внутритрубного инспектирующего снаряда (рис. 1).

Система представляет собой комплекс для определения координат продольной оси МТ с использованием ВИС, оснащенного интегрированной БИНС, корректируемой с использованием наружных аппаратных средств (маркеров). Система функционирует в двух режимах: режиме сбора данных и режиме последующей обработки. Она может быть охарактеризована как система с обзорно-сравнительным методом коррекции, использующим априорные сведения о координатах отдельных точек трубопровода, определенных в данном случае по сигналам СРНС ГЛОНАСС/GPS [4]. Специфика внутритрубной

диагностики МТ на основе применения ВИС заключается в том, что измерительная информация на борту ВИС не обрабатывается, записываются только показания датчиков для последующей обработки на ЭВМ. Таким образом, разделяются во времени операция сбора и обработки диагностической информации. Предлагается также разделить по времени операцию сбора показаний датчиков ИНС и операцию их постобработки в наземной подсистеме, функциональная схема которой приведена на рис. 2. Для комплексирования данных БИНС, показаний системы одометров снаряда и данных спутниковой радионавигационной системы (СРНС) используется расширенный фильтр Калмана и сглаживающий алгоритм. Задачей фильтра Калмана является оценка вектора погрешностей БИНС и одометра.

Вектор состояния S , оцениваемый фильтром Калмана (рис. 3) описывается выражением

$$S = (\Psi, \delta V, \delta k, \delta \alpha, \delta \beta, \Delta \omega, \Delta A)^T,$$

где Ψ – вектор погрешности пространственного положения снаряда, определенного по данным ИНС; δV – вектор погрешности скорости; ΔA – нестабильность смещения нуля акселерометров; $\Delta \omega$ – постоянная скорость ухода гироскопов; δk – погрешность корректирующего коэффициент масштаба одометра; $\delta \alpha$, $\delta \beta$ – погрешность корректирующих коэффициентов учитывающих погрешность установки гироскопических элементов по осям снаряда.

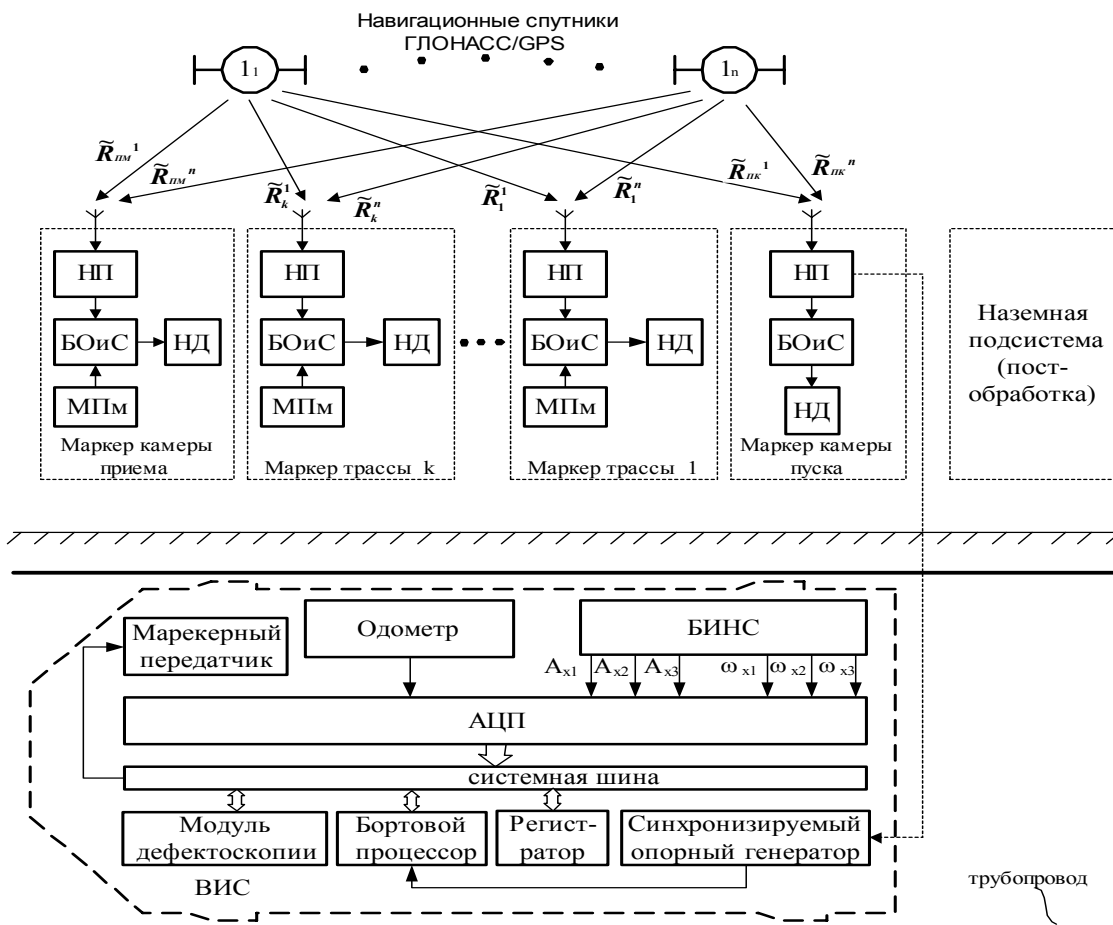


Рис. 1. Структурная схема системы комплексного обследования магистральных трубопроводов: НП – навигационный приемник; БОиС – блок обработки и сопряжения; МПм – маркерный приемник; НД – накопитель данных

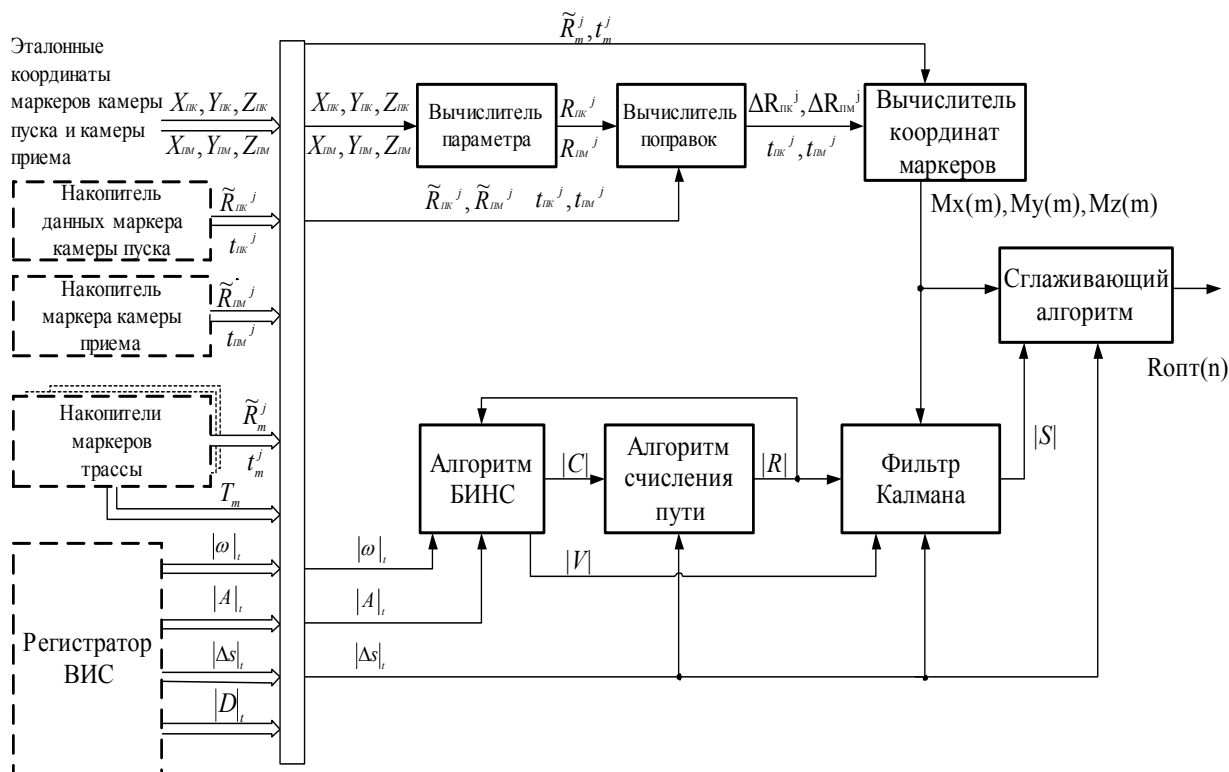


Рис. 2. Функциональная схема наземной подсистемы

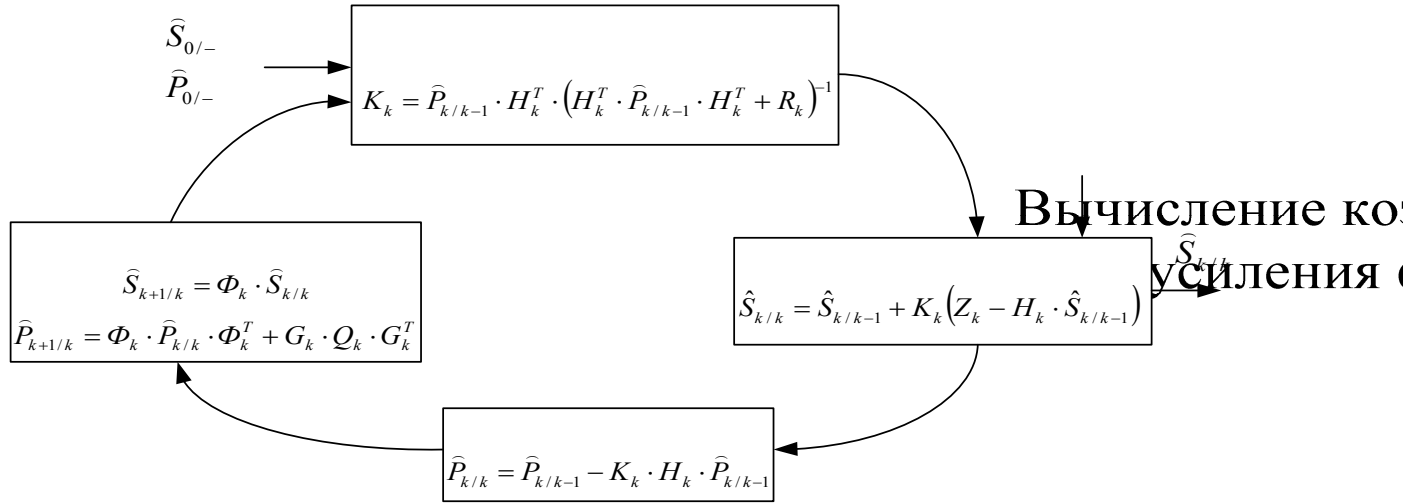


Рис. 3. Структура оптимального фильтра

Вектор измерений Z представляет собой вектор погрешностей и формируется как разность одноименных показаний ИНС и одометра, ИНС, СРНС. Вектор измерений на основе данных одометра определяется по выражению

$$z = \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ z_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} t_j \\ \int V \cdot 1x_1 dt - k\Delta s(j) \\ t_{j-1} \\ t_j \\ \int V \cdot 1x_2 dt - \alpha\Delta s(j) \\ t_{j-1} \\ t_j \\ \int V \cdot 1x_3 dt - \beta\Delta s(j) \\ t_{j-1} \end{bmatrix},$$

где V – вектор скорости, полученный по результатам измерений БИНС, k – корректирующий коэффициент масштаба одометра; α , β – корректирующие коэффициенты, учитывающие погрешность установки гироскопических элементов; t_{j-1} – временное соответствие началу j -го интервала замеров; t_j – временное соответствие концу j -го интервала замеров, $\Delta s(j)$ – показания одометра – расстояние, пройденное за j -й интервал замеров; $1x_1$, $1x_2$, $1x_3$ – единичные векторы, определяющие 3 ортогональных оси снаряда, положение которых в географической системе координат характеризуется строками матрицы направляющих косинусов C . При формировании вектора измерений с использованием данных СРНС применяется разность координат двух соседних маркеров (относительные координаты). Вектор измерений, полученный на основе данных о координатах маркеров, определенных по сигналам СРНС, в первом случае представляет собой погрешность счисления и формируется как разность счисленного положения маркера и положения маркера, определенного СРНС, или в относительных координатах:

$$z_4 = \begin{bmatrix} Rx(m) - Rx(m-1) \\ Ry(m) - Ry(m-1) \\ Rz(m) - Rz(m-1) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} Mx(m) - Mx(m-1) \\ My(m) - My(m-1) \\ Mz(m) - Mz(m-1) \end{bmatrix},$$

где $Rx(m)$, $Ry(m)$, $Rz(m)$ – счисленные координаты ВИС, соответствующие маркеру m ; $Mx(m)$, $My(m)$, $Mz(m)$ – координаты маркера m , определенные по данным СРНС.

Во втором случае координаты, соответствующие положению маркеров m и $m-1$, полученные по данным БИНС (интегрированием инерциального вектора скорости V), сравниваются с координатами маркеров, полученных по данным СРНС или, в относительных координатах,

$$z = \begin{bmatrix} z_7 \\ z_8 \\ z_9 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \int_{t_{N-1}}^{t_N} V_x dt \\ \int_{t_{N-1}}^{t_N} V_y dt \\ \int_{t_{N-1}}^{t_N} V_z dt \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} Mx(m) - Mx(m-1) \\ My(m) - My(m-1) \\ Mz(m) - Mz(m-1) \end{bmatrix}.$$

Полученный вектор погрешностей S используется в сглаживающем алгоритме, где происходит коррекция показаний БИНС, пересчет матрицы направляющих косинусов C , и на основании откорректированных данных заново запускается алгоритм счисления пути. Счисление для каждого участка между маркерами m и $m-1$ начинается с точно известного положения маркера $m-1$. Очевидно, что погрешность счисления нарастает по мере удаления от маркера $m-1$ и достигает максимального значения в точке m . Запуск в блоке оптимального сглаживания алгоритма счисления пути в обратном направлении с точно известного положения маркера m , формирует траекторию, погрешность которой минимальна у маркера m и максимальна в точке $m-1$. Оптимальная, комбинированная из прямого и обратного счисления пути оценка координат снаряда в каждой из

n точек между маркерами k и $k + 1$ определится по выражению

$$R_{\text{опт}}(n) = (P_{\text{прям}}(n)^{-1} + P_{\text{обр}}(n)^{-1}) \times \\ \times (R_{\text{прям}}(n)P_{\text{прям}}(n)^{-1} + R_{\text{обр}}(n)P_{\text{обр}}(n)^{-1}),$$

где $R_{\text{прям}}(n)$, $R_{\text{обр}}(n)$ – векторы численных координат во внутренней точке n между маркерами k и $k + 1$ для прямого и обратного счисления соответственно; $P_{\text{прям}}(n)$, $P_{\text{обр}}(n)$ – ковариационные матрицы погрешности для прямого и обратного счисления соответственно.

Учитывая, что Ψ , $\delta\alpha$, $\delta\beta$, δk меняются на интервале между маркерами медленно, принимается, что они постоянны. Ковариационные матрицы погрешности для прямого и обратного направления описываются выражениями

$$P_{\text{прям}}(n) = M(\delta R_{\text{прям}}(n) \delta R_{\text{прям}}^T(n)) = H_{\text{прям}}(n) \times \\ \times M(z z^T) H_{\text{прям}}^T(n) = H_{\text{прям}}(n) p(m) H_{\text{прям}}^T(n);$$

$$P_{\text{обр}}(n) = M(\delta R_{\text{обр}}(n) \delta R_{\text{обр}}^T(n)) = H_{\text{обр}}(n) \times \\ \times M(z z^T) H_{\text{обр}}^T(n) = H_{\text{обр}}(n) p(m) H_{\text{обр}}^T(n),$$

где M – оператор математического ожидания; $H_{\text{прям}}(n)$, $H_{\text{обр}}(n)$ – матрицы измерения; z – вектор погрешности $z = [\Psi x \ \Psi y \ \Psi z \ \delta k \ \delta\alpha \ \delta\beta]$; $p(N)$ – ковариационная матрица погрешности вектора z .

Таким образом, на выходе блока оптимального сглаживания для каждого интервала между маркерами получаем исправленные координаты ВИС $R_{\text{опт}}(n)$ в каждой n точке интервала.

Кроме описанного выше алгоритма коррекции данных БИНС точность определения координат в системе повышается за счет привязки временной шкалы измерительной системы к временной шкале спутниковой радионавигационной системы $L_1 \dots L_n$, тем самым повышается точность взаимной синхронизации меток времени системы маркеров и оборудования внутритрубного inspecting-устройства. Для этих целей перед пуском ВИС в камере пуска синхронизируемый опорный генератор соединяется с навигационным приемником камеры пуска на время, требуемое для синхронизации. Использование аппаратуры МРК-23 в составе комплекса маркеров позволит обеспечить синхронизацию временной шкалы снаряда и маркеров с погрешностью до 150 нс и определить координаты маркеров со среднеквадратической погрешностью ± 5 см в относительном режиме. В качестве опорных станций используют маркер камеры приема и маркер камеры пуска при условии, что эталонные координаты фазовых

центров антенн навигационных приемников известны.

Для оценки погрешностей системы проводилось математическое моделирование разработанных алгоритмов комплексирования с использованием пакета MathCAD 2001 Professional с соблюдением следующих условий:

- применялась система БИНС «Lasernav» с использованием лазерных гироскопов;
- расстояние между маркерами составляло 2 км;
- погрешность системы одометров равнялась $\pm 0,5\%$;
- погрешность определения координат маркеров составляла $\pm 0,5$ см.

По результатам моделирования погрешность определения координат трубопровода в области максимальной погрешности (в центре участка между маркерами) составила $\pm 0,5$ м. При уменьшении расстояния между маркерами до 500 м погрешность определяется погрешностью координат маркеров.

Разработанные алгоритмы и система могут быть использованы для определения пространственного положения подземного трубопровода с погрешностью менее 1 м. Это позволит применять результаты периодических тракторных измерений для контроля изменений пространственного положения трубопровода и оценки напряженных состояний, определения координат дефектов, а в комплексе с гидрографическими примерными системами – контролировать состояние подводных участков МТ.

Библиографический список

1. Шумайлов, А. С. Диагностика магистральных трубопроводов / А. С. Шумайлов, А. Г. Гумеров, О. И. Молдаванов. М.: Недра, 1992. 251 с.
2. Дмитриев, С. П. Инерциальные методы в инженерной геодезии / С. П. Дмитриев; ГНЦ РФ ЦНИИ «Электроприбор». СПб., 1997. 208 с.
3. Хренов, Н. Н. Применение аэрокосмических методов для диагностики трубопроводных геотехнических систем мониторинга окружающей среды / Н. Н. Хренов, С. А. Егурцов. М., 1996.
4. Пат. 2261424 RU C1 Российская Федерация. Система для определения координат трассы и координат дефектов подземного трубопровода / А. В. Андропов, В. И. Кокорин; опубл. 27.09.2005. Бюл. № 27.

A. V. Andropov

RAISE OF ACCURACY OF POSITIONING OF INTRATRUMPET INSPECTION GEARS WITH USE OF DATA GLONASS/GPS

It is considered the integration of data of the strapdown inertial navigational system of intratrumpet gear and coordinate data of points of correction (magloggers) equipped by receivers GLONASS/GPS with use of filtering and smoothing algorithms.