

# ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ПОДЗЕМНОЙ НАВИГАЦИИ НА ОСНОВЕ ИНТЕГРАЦИИ БИНС, ОДОМЕТРОВ И ПРИЕМНИКОВ GPS/ГЛОНАСС

В. Б. Никишин<sup>1</sup>, А. И. Синев<sup>2</sup>,

ЗАО «Газприборавтоматикасервис», Россия,

410086, г. Саратов, а/я 1271. Тел./факс: 8(8452)45-85-12, e-mail: nikishin@gpas.ru

П. К. Плотников<sup>3</sup>, С. Г. Наумов<sup>4</sup>

Саратовский государственный технический университет, Россия,

410054, г. Саратов, ул. Политехническая, 77. Тел. 8(8452)79-91-74, e-mail: pribor@sstu.ru

## Аннотация

**Ключевые слова:** дефектоскопия, позиционирование, инерциальная навигация, внутритрубный инспектирующий снаряд

*Рассмотрены два способа повышения точности и надежности выработки параметров навигации по показаниям внутритрубного инспектирующего снаряда (ВИС). В первом способе для определения пространственных координат ВИС во время отказов одометрической системы используются методы автономной инерциальной навигации. Второй способ предусматривает оценивание и компенсацию параметров азимутального дрейфа системы ориентации на основе построения квадратичных сплайн-функций ошибок позиционирования для двух смежных межмаркерных участков магистрального трубопровода (МТ).*

## Введение

Особенностями реализации методов ориентации и навигации для ВИС являются возможность использования метода постобработки сигналов бортового измерительного оборудования в составе инерциального измерительного модуля и одометрической системы; ограниченные возможности использования внешней информации. Так, координаты реперных точек МТ могут быть определены по сигналам спутниковых навигационных систем (СНС) в точках их вывода на поверхность Земли через 1..2 км (через 4...35 мин при скоростях движения ВИС 1...4 м/с); неинерциальные средства измерения текущего азимута ВИС недоступны.

Требования к точности пространственного позиционирования осевой линии, технологических элементов и дефектных мест МТ определены отраслевыми нормативными документами ОАО «ГАЗПРОМ» на уровне 2 м/км. Обеспечение такой точности методами автономной инерциальной навигации требует применения дорогостоящих прецизионных чувствительных элементов, что не всегда доступно. ЗАО «Газприборавтоматикасервис» и СГТУ имеют многолетний опыт разработки и эксплуатации навигационно-топографических комплексов (НТК) на основе инерциальных модулей среднего класса точности, установленных в гермоконтейнере ВИС и интегрированных с его одометрической системой и СНС. Среднеквадратичная погрешность позиционирования технологических элементов и дефектов МТ с помощью НТК составляет, как правило, не более 0,5 м. Это значительно превосходит все отечественные аналоги и соответствует лучшим зарубежным образцам подобной техники. К настоящему моменту с помощью НТК ЗАО «Газприборавтоматикасервис» выполнено пространственное позиционирование более 4000 км МТ диаметров от 420 до 1420 мм в России и за рубежом. Данный опыт подтверждает известное положение, что использование одометрической системы счисления пути при решении задачи пространственного позиционирования подвижных объектов существенно снижает требования к точности инерциального модуля.

Однако одометрическая система не всегда работает достаточно надежно. Существенные изменения коэффициента передачи одометра наблюдаются при изменении скорости движения ВИС, рельефа внутренней поверхности трубопровода, степени ее загрязнения и других факторов. Даже временные отказы одометрической системы приводят к снижению точности и необходимости повторных пропусков ВИС по МТ. В связи с вышеизложенным в работе решается задача повышения точности позиционирования МТ на основе использования бортовой БИНС, интегрированной с одометрической системой при использовании в режиме постобработки координат реперных точек МТ, полученных с помощью приемников GPS/ГЛОНАСС.

<sup>1</sup> Руководитель группы «Навигационных технологий» ЗАО «Газприборавтоматикасервис», к.т.н., доцент.

<sup>2</sup> Генеральный директор ЗАО «Газприборавтоматикасервис».

<sup>3</sup> Д.т.н. профессор кафедры приборостроения СГТУ.

<sup>4</sup> Ассистент кафедры приборостроения СГТУ.

## Использование методов автономной инерциальной навигации

В штатном режиме навигационное решение вырабатывается при постобработке сигналов интегрированной системы (бесплатформенная инерциальная система ориентации (БИСО) и одометрическая система) с коррекцией в реперных точках (рис. 1). В случае кратковременных отказов одометрической системы навигационные параметры определяются по показаниям автономной системы (БИНС).

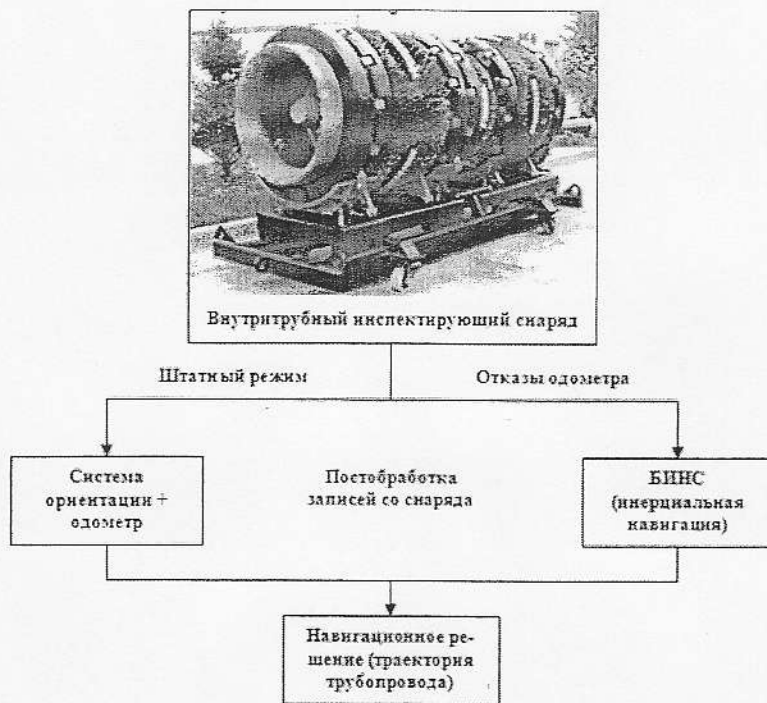


Рис. 1 Схема выработки навигационного решения

Для функционирования БИСО используются следующие алгоритмы в кватернионных параметрах (кватернионы угловых скоростей ПО и коррекции определены в горизонтном базисе  $\zeta$ , моделируемом в бортовом компьютере [1,2]), описывающие угловое движение системы ориентации:

$$\begin{aligned} 2\dot{\hat{v}}_0 &= -\hat{v}_1(\hat{\omega}_{\zeta 1} + \omega_{\zeta 1}^k) - \hat{v}_2(\hat{\omega}_{\zeta 2} + \omega_{\zeta 2}^k) - \hat{v}_3(\hat{\omega}_{\zeta 3} + \omega_{\zeta 3}^k) + \rho(1 - \hat{v}^2)\hat{v}_0; \\ 2\dot{\hat{v}}_1 &= \hat{v}_0(\hat{\omega}_{\zeta 1} + \omega_{\zeta 1}^k) + \hat{v}_3(\hat{\omega}_{\zeta 2} + \omega_{\zeta 2}^k) - \hat{v}_2(\hat{\omega}_{\zeta 3} + \omega_{\zeta 3}^k) + \rho(1 - \hat{v}^2)\hat{v}_1; \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} 2\dot{\hat{v}}_2 &= -\hat{v}_3(\hat{\omega}_{\zeta 1} + \omega_{\zeta 1}^k) + \hat{v}_0(\hat{\omega}_{\zeta 2} + \omega_{\zeta 2}^k) + \hat{v}_1(\hat{\omega}_{\zeta 3} + \omega_{\zeta 3}^k) + \rho(1 - \hat{v}^2)\hat{v}_2; \\ 2\dot{\hat{v}}_3 &= \hat{v}_2(\hat{\omega}_{\zeta 1} + \omega_{\zeta 1}^k) - \hat{v}_1(\hat{\omega}_{\zeta 2} + \omega_{\zeta 2}^k) + \hat{v}_0(\hat{\omega}_{\zeta 3} + \omega_{\zeta 3}^k) + \rho(1 - \hat{v}^2)\hat{v}_3; \\ \hat{v}^2 &= \hat{v}_0^2 + \hat{v}_1^2 + \hat{v}_2^2 + \hat{v}_3^2; \end{aligned} \quad (2)$$

$$\omega_{\zeta 1}^k = -k_1^p \hat{W}_{\zeta 3} - k_1^I \int_{t_0}^t \hat{W}_{\zeta 3} dt; \quad \omega_{\zeta 2}^k = \omega_{\zeta 1}^k \frac{2(\hat{\epsilon}_1 \hat{\epsilon}_2 - \hat{\epsilon}_0 \hat{\epsilon}_3)}{\sqrt{1 - 4(\hat{\epsilon}_1 \hat{\epsilon}_2 - \hat{\epsilon}_0 \hat{\epsilon}_3)^2}}; \quad \omega_{\zeta 3}^k = k_3^p \hat{W}_{\zeta 1} + k_3^I \int_{t_0}^t \hat{W}_{\zeta 1} dt, \quad (3)$$

где  $\hat{\omega}_{\zeta i}$  – оценки компонентов угловой скорости в базисе  $\zeta$ ;  $\hat{W}_{\zeta i}$  – оценки компонентов кажущегося ускорения в базисе  $\zeta$ ;  $\rho=1$  – коэффициент нормировки кватерниона  $\hat{v}$ ;  $\omega_{\zeta i}^k$  – угловые скорости коррекции в базисе  $\zeta$ ;  $\hat{v}_0, \hat{v}_3$  – компоненты оценки кватерниона ориентации;  $\hat{\epsilon}_0, \hat{\epsilon}_3$  – компоненты оценки кватерниона навигации;  $t$  – текущее время (время движения снаряда);  $t_0$  – начальное время;  $k_1^p, k_3^p$  – коэффициенты передачи членов позиционной коррекции;  $k_1^I, k_3^I$  – коэффициенты передачи членов интегральной коррекции;  $i = \overline{1,3}$ .

На практике из-за методических ошибок и ошибок округления норма кватерниона  $\hat{v}$  может отклоняться от единицы и являться источником дополнительных погрешностей. Поэтому в (1) вводится член  $\rho(1 - \hat{v}^2)\hat{v}_i$ , обеспечивающий нормировку кватерниона  $\hat{v}$  [3,4].

Преобразование координат, определяющее переход от трехгранника  $\zeta$  к объектовому  $X$ , задается следующей матрицей, выраженной в компонентах кватерниона:

$$\hat{A} = \begin{bmatrix} \hat{v}_0^2 + \hat{v}_1^2 - \hat{v}_2^2 - \hat{v}_3^2 & 2(\hat{v}_0\hat{v}_3 + \hat{v}_1\hat{v}_2) & 2(\hat{v}_1\hat{v}_3 - \hat{v}_0\hat{v}_2) \\ 2(\hat{v}_1\hat{v}_2 - \hat{v}_0\hat{v}_3) & \hat{v}_0^2 + \hat{v}_2^2 - \hat{v}_1^2 - \hat{v}_3^2 & 2(\hat{v}_0\hat{v}_1 + \hat{v}_2\hat{v}_3) \\ 2(\hat{v}_0\hat{v}_2 + \hat{v}_1\hat{v}_3) & 2(\hat{v}_2\hat{v}_3 - \hat{v}_0\hat{v}_1) & \hat{v}_0^2 + \hat{v}_3^2 - \hat{v}_1^2 - \hat{v}_2^2 \end{bmatrix}. \quad (4)$$

Приведение угловых скоростей и кажущихся ускорений к горизонтному базису будет осуществляться при помощи транспонированной матрицы  $\hat{A}^T$  в соответствии с выражениями:

$$\begin{bmatrix} \hat{W}_{\zeta_1} & \hat{W}_{\zeta_2} & \hat{W}_{\zeta_3} \end{bmatrix}^T = \hat{A}^T \begin{bmatrix} \hat{W}_{X1} & \hat{W}_{X2} & \hat{W}_{X3} \end{bmatrix}^T; \quad (5)$$

$$\begin{bmatrix} \hat{\omega}_{\zeta_1} & \hat{\omega}_{\zeta_2} & \hat{\omega}_{\zeta_3} \end{bmatrix}^T = \hat{A}^T \begin{bmatrix} \hat{\omega}_{X1} & \hat{\omega}_{X2} & \hat{\omega}_{X3} \end{bmatrix}^T,$$

где  $\hat{\omega}_{X_i}$ ,  $\hat{W}_{X_i}$  – оценки компонентов угловой скорости и кажущегося ускорения в базисе  $X$ , полученные с гироскопов и акселерометров.

По полученным оценкам компонентов кватерниона ориентации  $\hat{v}_0 \dots \hat{v}_3$  рассчитываются углы Эйлера-Крылова по следующим формулам [3,4]:

$$\hat{\psi} = \arctg \left( \frac{2(\hat{v}_0\hat{v}_2 - \hat{v}_1\hat{v}_3)}{\hat{v}_0^2 + \hat{v}_1^2 - \hat{v}_2^2 - \hat{v}_3^2} \right); \quad \hat{\theta} = \arcsin(2(\hat{v}_0\hat{v}_3 + \hat{v}_1\hat{v}_2)); \quad \hat{\gamma} = \arctg \left( \frac{2(\hat{v}_0\hat{v}_1 - \hat{v}_2\hat{v}_3)}{\hat{v}_0^2 + \hat{v}_2^2 - \hat{v}_1^2 - \hat{v}_3^2} \right). \quad (6)$$

В штатном режиме текущие координаты ВИС в базисе  $\zeta$  определяются на основе сигналов одометрической системы и решений задачи ориентации по сигналам БИСО:

$$\begin{bmatrix} \Delta \hat{\zeta}_k \end{bmatrix} = \hat{A}_k^T \begin{bmatrix} \Delta \hat{x}_k \end{bmatrix}; \quad \hat{\zeta}_i = \sum_{k=1}^n \Delta \hat{\zeta}_{ik}, \quad (i = \overline{1,3}), \quad (7)$$

где  $\Delta \hat{\zeta}_k = (\Delta \hat{\zeta}_{1k}, \Delta \hat{\zeta}_{2k}, \Delta \hat{\zeta}_{3k})$  – вектор оценок приращений декартовых координат на  $k$ -м такте;  $\hat{A}_k$  – оценка матрицы ориентации ВИС (трехгранника  $X$  относительно трехгранника  $\zeta$ ) на  $k$ -м такте;  $\Delta \hat{x}_k = (\Delta \hat{x}_{1k}, \Delta \hat{x}_{2k}, \Delta \hat{x}_{3k})$  – вектор оценок приращений пройденного пути по показаниям дискретного одометра на  $k$ -м такте (для ВИС  $\Delta \hat{x}_k = (\Delta \hat{x}_{1k}, 0, 0)$ ).

Навигационные параметры определяются следующим образом:

$$\hat{\phi} = \frac{\hat{\zeta}_1}{R}; \quad \hat{\lambda} = \frac{\hat{\zeta}_3}{R \cos \hat{\phi}}. \quad (8)$$

Сбои в работе одометрической системы выявляются при постобработке всей совокупности информации на основе:

- 1) анализа разности показаний разных каналов одометрической системы;
- 2) сопоставления оценок расстояния между реперами по данным системы позиционирования ВИС (БИСО + одометрическая система) и приемников СНС;
- 3) проверки с помощью наблюдающего устройства уровня невязки между проекциями на продольную ось ВИС вектора абсолютного линейного ускорения, определяемого по сигналам БИСО, и относительного линейного ускорения, определяемого по сигналам одометрической системы.

При выявлении временного отказа одометрической системы выработка навигационного решения осуществляется по показаниям БИНС. Решению навигационной задачи соответствуют следующие уравнения [1; 2]:

$$\begin{aligned} 2\dot{\hat{e}}_0 &= \hat{e}_1\omega_{\zeta_1}^k + \hat{e}_2\omega_{\zeta_2}^k + \hat{e}_3\omega_{\zeta_3}^k; & 2\dot{\hat{e}}_1 &= -\hat{e}_0\omega_{\zeta_1}^k - \hat{e}_2\omega_{\zeta_3}^k + \hat{e}_3\omega_{\zeta_2}^k; \\ 2\dot{\hat{e}}_2 &= -\hat{e}_0\omega_{\zeta_2}^k + \hat{e}_1\omega_{\zeta_3}^k - \hat{e}_3\omega_{\zeta_1}^k; & 2\dot{\hat{e}}_3 &= -\hat{e}_0\omega_{\zeta_3}^k - \hat{e}_1\omega_{\zeta_2}^k + \hat{e}_2\omega_{\zeta_1}^k. \end{aligned} \quad (9)$$

Здесь также возможны оценки навигационных параметров, выраженные через кватернионные параметры, по следующим формулам:

$$\hat{\phi} = \arctg \left( \frac{2(\hat{e}_1\hat{e}_2 - \hat{e}_0\hat{e}_3)}{\sqrt{1 - 4(\hat{e}_1\hat{e}_2 - \hat{e}_0\hat{e}_3)^2}} \right); \quad \hat{\lambda} = \arctg \left( \frac{2(\hat{e}_0\hat{e}_1 + \hat{e}_2\hat{e}_3)}{\hat{e}_0^2 + \hat{e}_2^2 - \hat{e}_1^2 - \hat{e}_3^2} \right) - Ut. \quad (10)$$

При наличии постоянных ошибок может наблюдаться нарастание погрешностей определения навигационных параметров.

## Использование реперных точек

При существующей методике [5] оценивания параметров азимутального дрейфа системы ориентации на основе использования координат начала и конца межмаркерного участка МТ имеет место неоднозначность решений, для разрешения которой используются плохо формализуемые процедуры, требующие привлечения дополнительной информации и наличия большого опыта оператора. Так, при точных начальных условиях (по координатам) погрешность определения координат конца межмаркерного участка по данным бортового оборудования ВИС определяется как азимутальным дрейфом системы ориентации, так и накопленной погрешностью угла азимута в начале межмаркерного участка. Погрешности одометрической системы удается компенсировать при повторных расчетах траектории движения ВИС на межмаркерном участке путем коррекции коэффициента передачи, а также на основе использования сигналов БИСО.

Формирование азимутальной коррекции ВИС с помощью усовершенствованного способа осуществляется с использованием координат не двух, а трех реперных точек, расположенных последовательно на траектории движения.

Оценка угла азимута принята в следующем виде

$$\hat{\psi} = \psi + \psi_0 + \omega t, \quad (11)$$

где  $\psi$  – истинный азимут,  $\psi_0$  – накопленная на предыдущем участке ошибка по углу азимута,  $\omega$  – угловая скорость азимутального дрейфа.

Получены уравнения, описывающие координаты траектории движения снаряда в идеальном виде для истинного азимута и координаты оценочной траектории для оценки угла азимута:

$$\begin{cases} \zeta_1 = \int_{t_0}^t V \cos \psi dt; \\ \zeta_3 = \int_{t_0}^t V \sin \psi dt, \end{cases} \quad \text{и} \quad \begin{cases} \hat{\zeta}_1 = \int_{t_0}^t \hat{V} \cos \hat{\psi} dt; \\ \hat{\zeta}_3 = \int_{t_0}^t \hat{V} \sin \hat{\psi} dt, \end{cases} \quad (12)$$

где  $\zeta_1, \zeta_3$  – северная и восточная координаты, соответственно,  $V, \hat{V}$  – скорость движения ВИС и ее оценка,  $\hat{\zeta}_1, \hat{\zeta}_3$  – оценка северной и восточной координат.

Погрешности оценивания координат

$$\Delta \zeta_1 = \hat{\zeta}_1 - \zeta_1, \quad \Delta \zeta_3 = \hat{\zeta}_3 - \zeta_3 \quad (13)$$

будут, в основном, определяться параметрами азимутального дрейфа БИСО. Пренебрегая погрешностью формирования оценок скорости поступательного движения ВИС, с учетом малости  $\psi_0$  и  $\omega$  запишем следующие уравнения ошибок для реперов двух ( $i=1,2$ ) смежных межмаркерных участков:

$$\begin{cases} \Delta \zeta_{1i} \approx - \int_{t_0}^{t_i} V (\psi_0 + \omega t) \sin \psi dt = - \psi_0 \zeta_{3i} - \omega \int_{t_0}^{t_i} V t \sin \psi dt, \\ \Delta \zeta_{3i} \approx \int_{t_0}^{t_i} V (\psi_0 + \omega t) \cos \psi dt = \psi_0 \zeta_{1i} + \omega \int_{t_0}^{t_i} V t \cos \psi dt. \end{cases} \quad (14)$$

Отметим, что траектория движения ВИС по МТ в плане, как правило, имеет кусочно-линейный вид. А при  $\psi = const$  первое и второе уравнения системы (14) оказываются линейно зависимыми. Таким образом, для одного межмаркерного участка система (14) плохо разрешима относительно  $\psi_0$  и  $\omega$ .

Для построения трехточечного алгоритма (для двух смежных участков) запишем выражения для радиус-векторов ошибок в следующем виде:

$$\begin{aligned} \Delta R_i^2 = \Delta \zeta_{1i}^2 + \Delta \zeta_{3i}^2 = \psi_0^2 (\hat{\zeta}_{1i}^2 + \hat{\zeta}_{3i}^2) + \\ + 2\omega \psi_0 \left( \hat{\zeta}_{3i} \int_{t_0}^{t_i} \hat{V} t \sin \hat{\psi} dt + \hat{\zeta}_{1i} \int_{t_0}^{t_i} \hat{V} t \cos \hat{\psi} dt \right) + \omega^2 \left( \left( \int_{t_0}^{t_i} \hat{V} t \cos \hat{\psi} dt \right)^2 + \left( \int_{t_0}^{t_i} \hat{V} t \sin \hat{\psi} dt \right)^2 \right); \end{aligned} \quad (15)$$

$(i=1,2).$

Решением системы (15) двух нелинейных уравнений являются четыре функции  $\psi_0(f(\hat{\psi}, t_i, \hat{V}, \hat{\zeta}_{1i}, \hat{\zeta}_{3i}, \Delta R_i))$  и соответствующие им четыре функции  $\omega(f(\hat{\psi}, t_i, \hat{V}, \hat{\zeta}_{1i}, \hat{\zeta}_{3i}, \Delta R_i))$ . Аналитический вид их, найденный в символьном виде с помощью пакета Mathematica, очень сложен и здесь не приводится. Поэтому решения находятся с помощью компьютера в символьном виде. Определяется пара решений, при которых траектория движения будет наиболее приближена к маркерным точкам. Числен-



ные значения решений определяются после расчета траектории движения ВИС с нулевыми значениями параметров азимутального дрейфа.

Апробация разработанных способов повышения точности для реального объекта была проведена при расчете траектории газопровода на участке трассы по данным опытно-промышленных испытаний ВИС СИТ-500 ЗАО «Газприборавтоматикасервис». Задача состояла в топографической привязке трубопровода к электронной карте местности. Были определены координаты газопровода на участке трассы, содержащей 42 реперных точки. При этом снаряд находился в движении 20746 с. В общей сложности за это время он прошел 40,6 км. Диаметр трубы  $\varnothing 0,5$  м.

Расстановка реперных точек была проведена предварительно при помощи приемников GPS/ГЛОНАСС, обладающих точностью позиционирования до 5 см.

В состав инерциального измерителя ВИС входили трехосный измеритель угловой скорости (волоконно-оптический гироскоп) ТИУС-500 фирмы ООО НПК «Оптолинк» и 3 акселерометра типа АК-6.

Результаты решения задачи позиционирования МТ показаны на рис. 2.

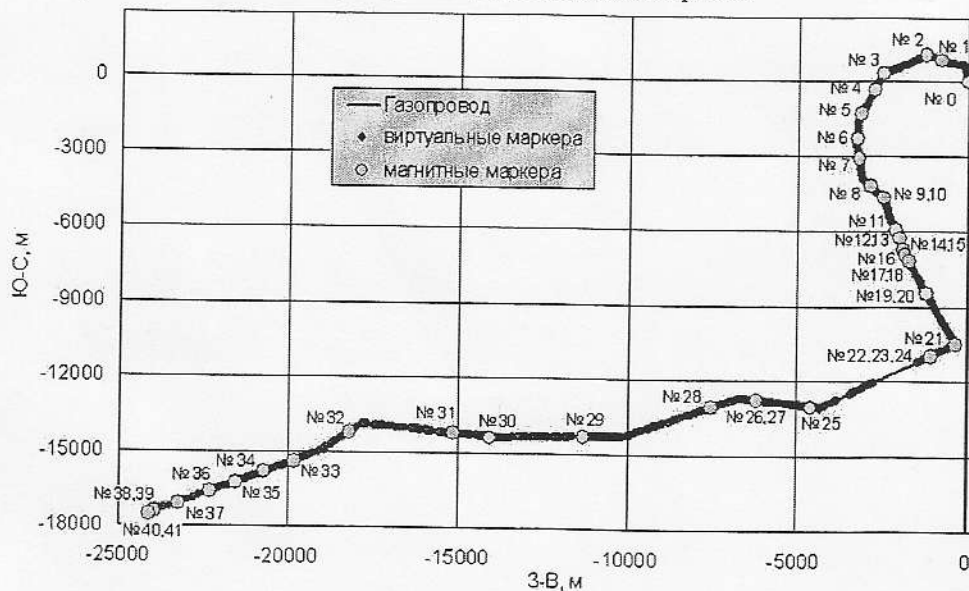


Рис. 2. План участка газопровода

Для целей коррекции путем определения параметров азимутального дрейфа использовались реперы, установленные над маркерами МТ – обозначены на рисунке как «магнитные маркера». Между ними с помощью приемников СНС геодезического класса точности определялись координаты от 5 до 15 дополнительных точек («виртуальные маркера») над осевой линией МТ, которые использовались для оценки точности решения задачи позиционирования МТ. Максимальное отклонение рассчитанных координат МТ от координат виртуальных маркеров составило 0,8 м. Данная точность незначительно отличается от достигаемой на основе «двухточечного» способа, однако «трехточечный» способ позволяет практически без итераций определять параметры азимутальной коррекции.

Исследования показали, что трехточечный алгоритм применим в условиях подземной навигации с характерными для ВИС режимами движения. Однако применимость его ограничена точностью используемых измерителей абсолютной угловой скорости (гироскопов). Особенностью разработанного метода является допущение, что на двух смежных участках азимутальный дрейф гироскопов постоянен. Это условие на межреперных участках (длина обычно около 2 км) выполнимо с приемлемой точностью для датчиков средней и высокой точности.

Обработка участков с различными видами траектории показала, что на прямых участках в горизонте, на участках со значительными поворотами траектории по азимуту (более 30 угл. град) и на траекториях, на которых снаряд совершал остановки, эффективность трехточечного метода различна. На прямых участках эффективность самая высокая – с первого просчета траектории поправки по азимуту вычисляются наиболее близкие к истинным значениям. Для окончательного просчета делается только небольшие поправки. На участках с остановками и значительными поворотами по азимуту поправки по азимуту вычисляются после нескольких просчетов траектории. Это связано с коррекцией коэффициента датчика приращения координат (одометра), из-за которого траектория движения может значительно изменяться на разных этапах просчетов. Однако количество просчетов на таких проблемных участках сказывается на времени обработки и не сказывается на точности позиционирования. В целом трехточечный метод показал свою эффективность и позволил повысить уровень автоматизации расчета координат МТ.

## Заключение

Показано, что формирование оценок параметров азимутального дрейфа для двух смежных межмаркерных участков МТ на основе построения квадратичных сплайн-функций ошибок позиционирования позволяет однозначно определять как накопленный азимутальный дрейф, так и среднее значение некомпенсированной вариации скорости азимутального дрейфа системы ориентации для рассматриваемого участка МТ. Разработанная программная реализация данного подхода позволяет существенно повысить уровень автоматизации решения задачи позиционирования МТ.

В ходе проведенных исследований также показано, что при использовании в составе инерциального модуля ВОГ типа ТИУС-500 и акселерометров типа АК-6 методами автономной навигации возможно определение пространственных координат ВИС с погрешностью не более 1 м на дистанции порядка 100 м. Это позволяет выявить и скомпенсировать кратковременные параметрические отказы одометрической системы. В целом применение указанных способов позволяет на 20-25% повысить точность позиционирования МТ при одновременном повышении технологичности постобработки данных обследования МТ.

## Литература

1. Плотников, П. К. Построение и анализ кватернионных дифференциальных уравнений задачи определения ориентации твердого тела с помощью бесплатформенной инерциальной навигационной системы / П. К. Плотников // Изв. РАН Механика твердого тела. – 1999. – №2 (26). – С. 3–14.
2. Плотников, П. К. Применение кватернионных алгоритмов в бесплатформенных инерциальных системах ориентации и локальной навигации / П. К. Плотников, В.Б. Никишин [и др.] // Авиакосмическое приборостроение. – 2003. – № 10. – С. 21–31.
3. Бранец, В. Н. Применение кватернионов в задачах ориентации твердого тела / В. Н. Бранец, И. П. Шмыглевский. – М.: Наука, 1973. – 320 с.
4. Челноков, Ю. Н. Кватернионные и бикватернионные модели и методы механики твердого тела и их приложения. Геометрия и кинематика движения / Ю. Н. Челноков. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2006. – 512 с.
5. Никишин, В. Б. Сопоставительный анализ инструментария, алгоритмов и точностных параметров позиционирования трасс и дефектов подземных трубопроводов с помощью БИНС и GPS / В. Б. Никишин, А. И. Синев, П. К. Плотников // Материалы XVI Санкт-Петербургской междунар. конф. по интегрированным навигационным системам // СПб.: ГНЦ РФ ЦНИИ «Электроприбор», 2009. – С. 163–168.