МЕХАНИКА
ТВЕРДОГО ТЕЛА
№ 3 • 2003

УДК 531.7

© 2003 г. И.А. ПАПУША, Н.А. ПАРУСНИКОВ

ОБ ОДНОМ МЕТОДЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕСТОПОЛОЖЕНИЯ ДЕФЕКТОВ В ГАЗОПРОВОДЕ

Решается задача об определении местоположения дефектов в газопроводе при помощи информации, доставляемой инерциальной навигационной системой (ИНС) и датчиком стыков труб. Предполагается, что вычисление координат осуществляется в режиме постобработки. Задача решается на модельном уровне.

Одним из способов определения координат дефектов в газопроводе может служить постобработка информации системы, которая помимо дефектоскопа включает в себя ИНС и счетчик числа стыков труб. Вопросы технической реализации такой системы рассматриваться не будут.

Система, помещенная в контейнер, перемещается в газопроводе вместе с газом. В этом случае задача может быть сведена к задаче коррекции в режиме сглаживания при помощи скоростной информации.

Для определенности в качестве ИНС будем рассматривать двухкомпонентную инерциальную систему с горизонтируемой платформой. При этом будут определяться географические координаты – широта и долгота. Задача определения высоты требует специальных средств и здесь не рассматривается. При описании математической постановки будем следовать [1][1].

Введем следующие системы координат и обозначения. Трехгранник $Mx_1x_2x_3(Mx)$ связанный с движущимся объектом; M – точка, отождествляемая с объектом; Mx_3 – направление нормали к навигационному эллипсоиду Земли; ориентация в азимуте доопределяется тем или иным способом.

Модельный трехгранник $Mx'_1x'_2x'_3(Mx')$ – числовой образ трехгранника Mx, полученный в бортовом алгоритме ИНС. Приборный трехгранник $Mz_1z_2z_3(Mz)$ вводится так, чтобы его оси совпадали с осями чувствительности ньютонометров ИНС.

Взаимная ориентация трехгранников определяется векторами углов малого поворота $\boldsymbol{\beta}, \boldsymbol{\gamma}$, для которых выполнены соотношения $l_z = (E + \hat{\beta}_x)l_{x'}$, $l_{x'} = (E + \hat{\gamma}_x)l_x$. Здесь $l_z, l_{x'}$ – проекции некоторого вектора $\mathbf{l}$ на соответствующие оси, $\hat{\beta}$, $\hat{\gamma}$ обозначают кососимметрические матрицы, поставленные в соответствие векторам $\boldsymbol{\beta}, \boldsymbol{\gamma}$.

В проекциях на оси трехгранника Mx обозначим: $\mathbf{u}_\mathbf{x} = (u_1u_2u_3)^T$ – вектор угловой скорости Земли; $\boldsymbol{\omega}_x = (\omega_1\omega_2\omega_3)^T$ – вектор абсолютной угловой скорости трехгранника Mx; $\boldsymbol{\upsilon}_x = (\upsilon_1\upsilon_2\upsilon_3)^T$ – вектор абсолютной скорости точки M; $\mathbf{V}_\mathbf{x} = (V_1V_2V_3)^T$ – вектор относительной скорости точки M; $\mathbf{g}_\mathbf{x}$ – вектор силы тяготения; $\mathbf{f}_\mathbf{x}$ – вектор внешней силы, воздействующей на чувствительную массу; $r = \mathbf{x}^T\mathbf{x}$ – радиус-вектор точки M; $\omega_0^2 = g/r$; a – большую полуось навигационного эллипсоида Земли.

---

[1] См. также Алгоритмы корректируемых инерциальных навигационных систем: Голован А.А., Горицкий А.Ю., Парусников Н.А., Тихомиров В.В. Препринт 2. М.: МГУ, 1994.

Аналогичные параметры в трехгранниках Mx' и Mz отмечаются штрихами и z соответственно.

Обозначим ошибки определения координат и скоростей модельным алгоритмом ИНС как $\delta\mathbf{x} = \mathbf{x}' - \mathbf{z}$ и $\delta\boldsymbol{\upsilon} = \boldsymbol{\upsilon}' - \boldsymbol{\upsilon}_z$, и инструментальные погрешности: $\boldsymbol{\nu}_z = \boldsymbol{\omega}'' - \boldsymbol{\omega}'$ – вектор ошибки информации об угловой скорости приборного трехгранника, $\Delta\mathbf{f} = \mathbf{f}' - \mathbf{f}$ – вектор погрешностей ньютонометров ИНС.

Уравнения ошибок выглядят следующим образом:

$$\delta\dot{x}_1 = \delta\upsilon_1 + \omega_3\delta x_2 + r\nu_2, \quad \delta\dot{x}_2 = \delta\upsilon_2 - \omega_3\delta x_1 - r\nu_1$$

$$\delta\dot{\upsilon}_1 = -\omega_0^2\delta x_1 + \omega_3\delta\upsilon_2 + \omega_2(\omega_2\delta x_1 - \omega_1\delta x_2) + \Delta f_1 - \upsilon_2\nu_3$$

$$\delta\dot{\upsilon}_2 = -\omega_0^2\delta x_2 - \omega_3\delta\upsilon_1 + \omega_1(\omega_1\delta x_2 - \omega_2\delta x_1) + \Delta f_2 + \upsilon_1\nu_3$$

$$\dot{\beta}_1 = \omega_3\beta_2 - \omega_2\beta_3 + \nu_1, \quad \dot{\beta}_2 = -\omega_3\beta_1 + \omega_1\beta_3 + \nu_2$$

$$\dot{\beta}_3 = \omega_2\beta_1 - \omega_1\beta_2 + \nu_3$$

Полагаем $\dot{\boldsymbol{\nu}} = 0$, а $\Delta\mathbf{f}$ считаем белым шумом (постоянную составляющую $\Delta\mathbf{f}$ далее можно не учитывать).

Полные ошибки координат и скоростей определяются как $\Delta\mathbf{x} = \delta\mathbf{x} + \hat{\beta}\,\mathbf{x}$, $\Delta\boldsymbol{\upsilon} = \delta\boldsymbol{\upsilon} + \hat{\beta}\,\boldsymbol{\upsilon}$, где $\Delta\mathbf{x}$ – проекция на горизонтальную плоскость составляющих вектора MM'.

Вычисленные величины вектора состояния модельных уравнений уточняются поправками, полученными в результате оценивания ошибок системы при помощи дополнительной информации. Математическая схема процесса коррекции и коррекционные алгоритмы приведены в[2].

Дополнительной информацией при коррекции будут служить данные счетчика числа стыков труб n, зафиксированные синхронно со временем t прохождения измерительной системой стыков газопровода. По известной с погрешностью ΔL длине трубы L вычисляется скорость движения системы $\mathbf{V}' = \mathbf{V} + \Delta\mathbf{V} = n(L + \Delta L)/t$ относительно осевой линии газопровода, где $\Delta\mathbf{V}$ – ошибка определения скорости. Формируется вектор коррекции $\mathbf{z} = \mathbf{V}' - \mathbf{V}_z$. Выражения для компонент вектора имеют вид

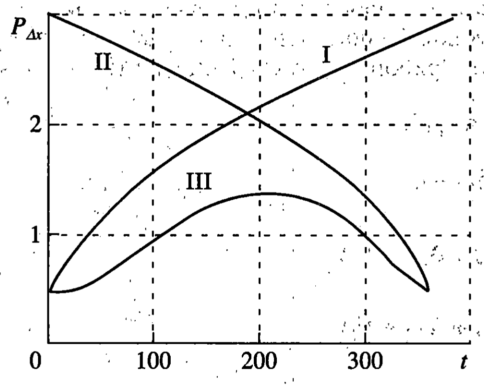
$$\begin{aligned} z_1/a &= \delta\upsilon_1/a - u_3\gamma_1 - u_1\beta_3 + w_1 \\ z_2/a &= \delta\upsilon_2/a - u_3\gamma_2 - u_2\beta_3 + w_2 \end{aligned} \tag{1}$$

где w – немоделируемая погрешность измерений.

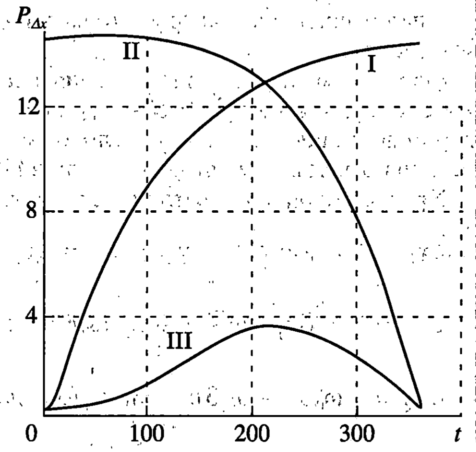
Таким образом, задача сводится к получению оценки вектора состояния $[\delta x_1, \delta x_2, \delta\upsilon_1, \delta\upsilon_2, \beta_1, \beta_2, \beta_3, \nu_1, \nu_2]^T$ линейной динамической системы 9-го порядка по измерениям (1).

Численное моделирование проводилось для исследования точностных возможностей метода. Учитывались влияние инструментальных погрешностей ИНС, ошибок формирования дополнительной скоростной информации и возможные колебательные движения в газовом потоке корпуса приборного блока относительно трубопровода. В качестве оценивателя использовался субоптимальный алгоритм сглаживания калмановского типа [2].

Моделирование проводилось в следующих предположениях: – длина участка газопровода порядка 100 км, координаты начала и конца участка известны, скорость движения газового потока 100 км/ч; длина труб $L = 12$ м с максимальной погрешностью



Фиг. 1



Фиг. 2

ΔL = 10 см, ошибка дополнительной скоростной информации моделировалась процессом белого шума с σ равной 1/3 от предельной ошибки;

шаг дискретизации времени системы 1 *с*;

инструментальные погрешности ИНС: $\nu \sim 0.01$ градуса в час, $\Delta \mathbf{f} \sim 5 \cdot 10^{-5} g$;

для осуществления сглаживания алгоритм фильтрации реализовывался в прямом и обратном времени. В прямом времени были взяты близкие к нулю значения начальной матрицы ковариаций ошибок оценок. В обратном времени использовался субоптимальный фильтр Калмана, при инициализации стартовой точки которого бралось большое значение ковариационной матрицы ошибок оценок, кроме переменных, обозначающих ошибку координат;

при выборе калмановских коэффициентов усиления в сглаживающем алгоритме учитывалась только ковариация ошибки скорости.

Результаты моделирования с использованием прямого и сглаживающего фильтра Калмана представлены на фиг. 1. Максимальная среднеквадратичная ошибка определения координат $P_{\Delta x}$ при сглаживании составила 1.6 м.

При более точном анализе следует учитывать возможные азимутальные колебания корпуса системы относительно трубы газопровода. В качестве примера такого учета на фиг. 2 приведены результаты моделирования работы системы при случайных колебаниях с корреляционной функцией вида $K(\tau) = \sigma^2 \exp - \lambda\tau$, где период корреляции выбран $T = 1/\lambda = 1$ с, а среднеквадратичная амплитуда колебаний равна 0.5°.

Таким образом, методы инерциальной навигации являются вполне приемлемыми для решения задачи топопривязки дефекта газопровода и обеспечивают при этом высокую точность. Дополнительно необходим специальный анализ, учитывающий особенности конструкции измерительной системы. Открытым пока остается вопрос об определении высоты (глубины) аварийного участка.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Парусников Н.А., Морозов В.М., Борзов В.И.* Задача коррекции в инерциальной навигации. М.: Изд-во Моск ун-та, 1982. 174 с.
2. *Александров В.В., Болтянский В.Г., Лемак С.С., Парусников Н.А., Тихомиров В.М.* Оптимизация динамики управляемых систем. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2000. 302 с.

Москва

Поступила в редакцию
8.08.2001