

чиков и контроллера позволило использовать технологию трехмерной печати для всех деталей прибора. Для автономной работы инклинометр дополнительно оснащен блоком аккумуляторов. Натурные испытания макета инклинометров показали стабильную точность и низкий дрейф углов наклона на неподвижном основании.

Ключевые слова: угломер; микромеханический датчик; Arduino; Matlab.

Oleksandr Sapegin, Grygoriy Strokach

MICROELECTROMECHANICAL INCKINOMETER

National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv, Ukraine

A variety of inclinometers are often used to measure the angle of inclination on moving objects of low maneuverability. Often, these are large devices, with a various pendulum as sensitive elements. The use of modern microelectromechanical sensing elements, as well as small microprocessors in combination with three-dimensional printing technology allows creating small and cheap devices. The paper presents the results of the synthesis of algorithmic and software micromechanical inclinometer, as well as the developed design. The micromechanical inertial measuring module MPU 6050 was used as sensitive elements, the microcontroller of the Arduino family acted as the onboard computer. An algorithmic software for the inclinometer based on the use of inertial navigation tools, namely numerical integration of the Poisson orientation equation, has been developed. Zero drifts of micromechanical gyroscopes were partially compensated by the introduction of a complementary filter. It allows you to use the signals of the accelerometers MPU 6050 for the current correction of the output matrix of the guide cosines. A series of tests was performed to select the optimal filter gain. The software for the Arduino platform in the Matlab Simulink environment was developed. This significantly accelerated the process of development and testing of the device. The case is developed in the SolidWorks environment. The use of miniature sensors and a controller allowed the use of three-dimensional printing technology for all parts of the device body. For autonomous operation, the inclinometer was additionally equipped with a battery pack. Field tests of the inclinometer model showed stable accuracy and low drift of angles on a fixed base.

Keywords: inclinometer; microelectromechanical sensors; Arduino; Matlab.

Надійшла до редакції

04 червня 2020 року

Рецензовано

17 червня 2020 року

УДК 629.051

О ТОЧНОСТИ НЕКОТОРЫХ “РАСШИРЕННЫХ” АЛГОРИТМОВ БЕСПЛАТФОРМЕННЫХ ИНЕРЦИАЛЬНЫХ СИСТЕМ ОРИЕНТАЦИИ

Лазарев Ю. Ф., Аврутов В. В., Мироненко П. С.

Национальный технический университет Украины

«Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского», Киев, Украина

E-mail: mironenkops46@gmail.com

Введение. Основной проблемой при разработке алгоритмов бесплатформенных инерциальных систем ориентации является повышение их точности. Большинство алгоритмов, приводимых в известной литературе (см., например, [1]-[4]), опираются на упрощенную формулу Борца, в которой в правой части не учитывается член дифференциального уравнения ориентации с двойным векторным произведением. Представляет интерес выяснить, как повлияет на точность алгоритма "расширение" уравнения ориентации учетом отброшенного члена.

Основная часть. Методика исследований точности алгоритмов сводится к определению значений двух неизвестных параметров, которые характеризуют точность алгоритма: порядка точности и коэффициента пропорциональности. Такой подход позволяет провести моделирование лишь для некоторых конкретных значений амплитуды и частоты колебаний основания, а полученные результаты обобщить на любые амплитуды и частоты. Оценка эффективности рассматриваемых алгоритмов производится посредством сравнительного исследования систематической погрешности известных двухшаговых алгоритмов, опирающихся на измерения приращений квазикоординат поворота основания на каждом шаге опроса измерителей.

Выводы. Использование дополнительного члена в уравнении ориентации не всегда приводит к повышению точности по сравнению с алгоритмами, использующими упрощенную форму уравнения ориентации. Исследования показали, что при этом точность ухудшается в области малых значений частотного параметра. Был исследован также алгоритм, полученный эмпирическим путем, использование которого приводит к существенному повышению точности (на два порядка в области малых значений частотного параметра). В целом, можно утверждать, что использование дополнительного члена в уравнении ориентации приводит к ухудшению точности по сравнению с более простыми алгоритмами, а также к значительному увеличению вычислительных операций.

Ключевые слова: бесплатформенные инерциальные системы ориентации; исследование точности алгоритмов; выпрямительный эффект.

Введение

Компьютерное моделирование процесса обработки измерительной информации в бесплатформенных инерциальных системах ориентации (БИСО) различными алгоритмами показало [5, 6], что при некоторых угловых движениях основания средние значения погрешностей определения углов поворота основания со временем непрерывно растут с постоянной скоростью (возникает так называемый "дрейф" погрешности алгоритма). При этом дрейф алгоритма иногда бывает настолько большим, что через несколько минут ошибки определения углов, обусловленные им, начинают преобладать над другими составляющими погрешности алгоритма [7 – 9]. С этого момента погрешность, обусловленная дрейфом, определяет точность алгоритма.

Причиной возникновения дрейфов алгоритмов является выпрямительный эффект из-за наличия в интегрируемых кинематических уравнениях ориентации мультипликативных членов [10 – 12]. Характерные особенности выпрямительного эффекта таковы:

- он возникает при синхронных колебаниях множителей мультипликативных членов;
- он существенно зависит от сдвига фаз между колебаниями этих множителей.

В случае интегрирования уравнений ориентации дрейф погрешности определения одного из углов поворота основания возникает при синхронных колебаниях основания вокруг осей двух других углов поворота. Его величина и направление определяются сдвигом фаз между этими колебаниями. Зависимость дрейфа от сдвига фаз – гармоническая с периодом 2π . Очевидно, для анализа предельной точности алгоритма следует опираться на амплитудное значение дрейфа в этой зависимости.

Постановка задачи

Основной целью работы является исследование алгоритмов БИСО, обеспечивающих эффективное ослабление систематических погрешностей системы, возникающих при наличии в интегрируемых кинематических уравнениях мультипликативных членов.

Исследование точности алгоритмов осуществлялось на основе компьютерного моделирования в среде Matlab процесса обработки измерительной

информации исследуемыми алгоритмами. При этом для определенности изучался дрейф погрешности определения угла ψ , а основание совершает синхронные гармонические колебания по углам ϑ и γ с частотой ω , амплитудами ϑ_m и γ_m , сдвинутые по фазе на величину ε :

$$\psi(t) \equiv 0; \quad \vartheta(t) = \vartheta_m \sin(\omega t + \varepsilon); \quad \gamma(t) = \gamma_m \sin \omega t. \quad (1)$$

Конечным результатом моделирования является установление зависимости "амплитуды"

$$Dr = \left| \left\langle \frac{d\Delta\psi}{dt} \right\rangle_{\max} \right|$$

дрейфов от 1) шага h опроса измерителей; 2) частоты ω колебаний основания; 3) амплитуды угловых колебаний основания.

Предварительные результаты

Модельные исследования различных алгоритмов БИСО показали [2], что максимальные по величине дрейфы ("амплитуды") Dr любых видов алгоритмов:

- 1) пропорциональны произведению $\vartheta_m \cdot \gamma_m$ амплитуд колебаний основания;
- 2) пропорциональны величине шага опроса измерителей h в некоторой целой степени N , которую в прикладной математике принято называть порядком точности алгоритма;
- 3) пропорциональны частоте ω колебаний основания в степени, на единицу большей порядка точности.

Пользуясь этими свойствами можно, с достаточной для практического применения точностью, описать исследуемую зависимость обобщенной формулой

$$Dr = k \cdot \vartheta_m \cdot \gamma_m \cdot \omega^{N+1} \cdot h^N.$$

Если перейти от абсолютных величин дрейфов к изучению их отношения к величине $\vartheta_m \gamma_m \omega$, а в качестве аргумента принять не шаг опроса h , а, так называемый, частотный параметр $\mu = \omega h$, то исследование характеристик точности сводится к установлению зависимости $\delta(\mu)$, где

$\delta = \frac{Dr}{g_m \gamma_m \omega}$, причём вид этой зависимости известен заранее:

$$\delta = k \cdot \mu^N. \quad (2)$$

Таким образом, исследование точности алгоритмов сводится к установлению значений двух неизвестных параметров, которые и характеризуют точность алгоритма: порядка N точности и коэффициента пропорциональности k . Такой подход позволяет провести моделирование лишь для некоторых конкретных значений амплитуд и частоты колебаний основания, а полученные результаты обобщить на любые амплитуды и частоты.

При этом при каждом выбранном значении шага опроса необходимо предварительно установить тот сдвиг фаз, при котором будет наблюдаться максимальный по величине дрейф погрешности.

Результаты исследования

За основу примем известный двухшаговый алгоритм, использующий измерения приращений квазиординат и описываемый формулой

$$\varphi(2h) = \mathbf{q}_1 + \mathbf{q}_2 + \frac{2}{3} \mathbf{q}_1 \times \mathbf{q}_2. \quad (3)$$

Этот алгоритм рассмотрен в [3, с. 6] и соответствует формуле (3.3.15), приведенной в [1, с. 150].

Алгоритм, осуществляющий вычисления по формуле (3), назовем Ноехр. Он реализован в программе моделирования процедурой OPR2h:

```
function FI = OPR2h(h,t)
% Двухшаговый безразгонный алгоритм метода
Пикара
% вычисления вектора Эйлера по измерению
квазиординат
% t - момент времени начала шага интегрирования
% h - шаг опроса измерителей
% FI - приращение вектора Эйлера за время
H=2h
% q1 - приращение квазиординат на интервале
от t до t+h
% q2 - приращение квазиординат на интервале
от t+h до t+2h

% Лазарев Ю. Ф. 29-08-2016
z1=UgDvObPseudo(t+h,h);
q1=[z1(4) z1(5) z1(6)];
z2=UgDvObPseudo(t+2*h,h);
q2=[z2(4) z2(5) z2(6)];
q12=q1+q2; q1Xq2=cross(q1,q2);
FI=q12+2*q1Xq2/3;
```

В качестве расширенного двухшагового алгоритма рассмотрим алгоритм

$$\varphi(2h) = \mathbf{q}_1 + \mathbf{q}_2 + \frac{2}{3} \mathbf{q}_1 \times \mathbf{q}_2 + \frac{1}{60} (7\mathbf{q}_1 + 3\mathbf{q}_2) \times (\mathbf{q}_1 \times \mathbf{q}_2), \quad (4)$$

полученный В. В. Аврутовым при учете в уравнении ориентации дополнительного члена в виде $\frac{1}{12} \boldsymbol{\varphi} \times (\boldsymbol{\varphi} \times \boldsymbol{\omega})$ и нахождении полного второго приближения методом Пикара.

Алгоритм (4) назовем Exp_A. Он представлен процедурой OPR2hA:

```
function FI = OPR2hA(h,t)
% Двухшаговый безразгонный алгоритм метода
Пикара
% вычисления вектора Эйлера по измерению
квазиординат
% модификация Аврутова В.В.
% t - момент времени начала шага интегрирования
% h - шаг опроса измерителей
% FI - приращение вектора Эйлера за время h
% q1 - приращение квазиординат на интервале
от t до t+h
% q2 - приращение квазиординат на интервале
от t+h до t+2h

% Лазарев Ю.Ф. 10-07-2018
z1=UgDvObPseudo(t+h,h);
q1=[z1(4) z1(5) z1(6)];
z2=UgDvObPseudo(t+2*h,h);
q2=[z2(4) z2(5) z2(6)];
q12=q1+q2; q1Xq2=cross(q1,q2);
A = 7*q1+3*q2;
FI=q12 + 2*q1Xq2/3 + cross(A,q1Xq2)/60;
```

Кроме этого изучим алгоритм Exp_L, реализующий вычисления по формуле

$$\varphi(2h) = \mathbf{q}_1 + \mathbf{q}_2 + \frac{2}{3} \mathbf{q}_1 \times \mathbf{q}_2 + \frac{13}{2} (\mathbf{q}_2 - \mathbf{q}_1) \times (\mathbf{q}_1 \times \mathbf{q}_2), \quad (5)$$

предлагаемый Ю. Ф. Лазаревым (получен эмпирическим путем) и представленный процедурой OPR2hB:

```
function FI = OPR2hB(h,t)
% Расширенный двухшаговый безразгонный
алгоритм метода Пикара
% вычисления вектора Эйлера по измерению
квазиординат
% модификация Аврутова-Лазарева.
% t - момент времени начала шага интегрирования
% h - шаг опроса измерителей
% FI - приращение вектора Эйлера за время h
```

% q1 - приращение квазиординат на интервале от t до t+h

% q2 - приращение квазиординат на интервале от t+h до t+2h

% Лазарев Ю. Ф. 09-07-2018

z1=UgDvObPseudo(t+h,h);

q1=[z1(4) z1(5) z1(6)];

z2=UgDvObPseudo(t+2*h,h);

q2=[z2(4) z2(5) z2(6)];

q12=q1+q2; q1Xq2=cross(q1,q2);

A = 78*(q2-q1);

FI=q12 + 2*q1Xq2/3 + cross(A,q1Xq2)/12;

Компьютерное моделирование проведено при следующих значениях параметров:

$$a = g_m = \gamma_m = 0,1; \quad \omega = 1 \text{ 1/c.} \quad (6)$$

Некоторые результаты его приведены на рисунках 1 и 2.

Более детально результаты модельного исследования приведены в программе Faza1 и табл. 1.

% Faza1

clear all, clc

eps=[-180 -150 -120 -90 -60 -30 0 ...
30 60 90 120 150 180];

D01=[-2.17e-13 8.06e-9 1.4e-8 1.61e-8 1.4e-8
8.06e-9 2.17e-13 ...

-8.06e-9 -1.4e-8 -1.61e-8 -1.4e-8 -8.06e-9 -2.13e-13];

DA01=[6.2e-9 1.38e-8 1.71e-8 1.62e-8 1.09e-8
2.74e-9 -6.2e-9 ...

-1.35e-8 -1.71e-8 -1.62e-8 -1.09e-8 -2.74e-9 6.2e-9];

DL01=[-1.79e-12 3.99e-11 9.07e-11 1.18e-10
9.38e-11 4.38e-11 1.79e-12 ...

-3.99e-11 -9.07e-11 -1.18e-10 -9.38e-11 -4.38e-11 -1.79e-12];

subplot(1,2,1),
plot(eps,D01,'s-',eps,DA01,'o--','LineWidth',3), grid

set(gca, 'FontSize',14)
title('h=0,1'), ylabel('Дрейф '),

xlabel('\epsilon, градусы '),
legend('Noexp','Exp-A')

subplot(1,2,2),

plot(eps,DL01,'ro','LineWidth',3),grid

set(gca, 'FontSize',14), title('h=0,1'),

xlabel('\epsilon, градусы '), legend('Exp-L')
%%%%%%%%%

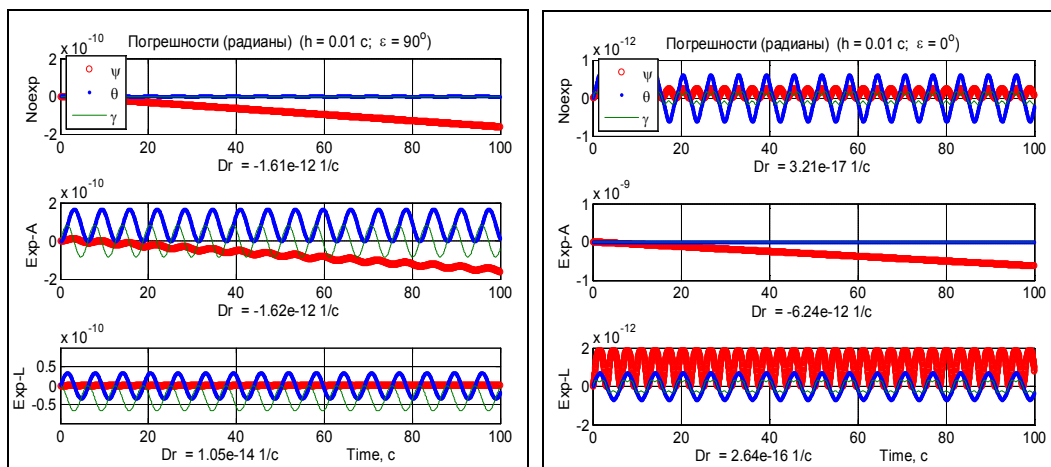


Рис. 1. Шаг опроса h=0.01 с, сдвиг фаз $\epsilon = 90^\circ$ и $\epsilon = 0^\circ$

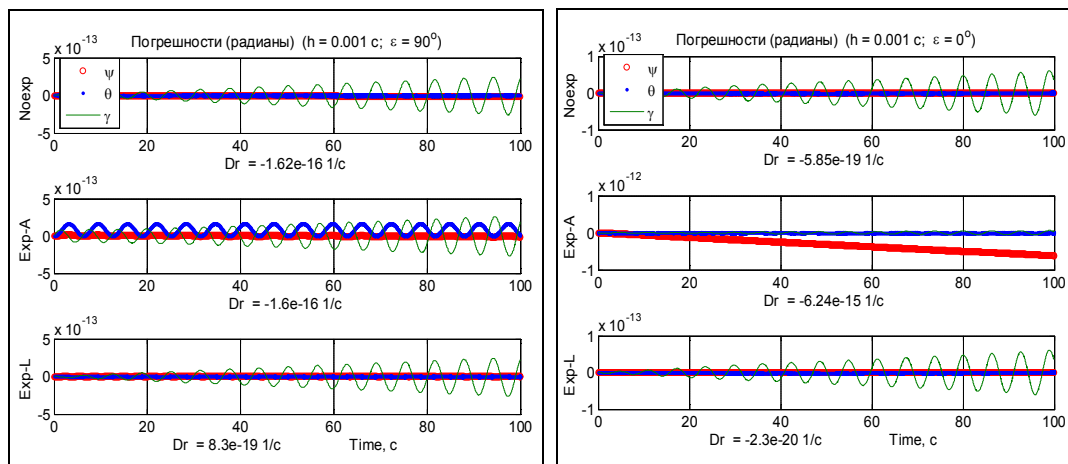


Рис. 2. Шаг опроса h=0.001 с, сдвиг фаз $\epsilon = 90^\circ$ и $\epsilon = 0^\circ$

```
D001=[-3.19e-17 8.07e-13 1.4e-12 1.61e-12 1.4e-
12 8.07e-13 3.21e-17 ...
-8.06e-13 -1.4e-12 -1.61e-12 -1.4e-12 -8.07e-
13 -3.19e-17];
DA001=[6.24e-12 6.21e-12 4.52e-12 1.62e-12 -
1.71e-12 -4.59e-12 -6.24e-12 ...
-6.21e-12 -4.52e-12 -1.62e-12 1.71e-12 4.59e-
12 6.24e-12];
DL001=[-2.63e-16 -7.31e-15 -1.04e-14 -1.05e-14 -
9.89e-15 -6.73e-15 2.64e-16 ...
7.31e-15 1.04e-14 1.05e-14 9.89e-15 6.73e-15 -
2.63e-16];
figure, subplot(1,2,1),
plot(eps,D001,'s-',eps,DA001,'o--','LineWidth',3),
grid
set(gca, 'FontSize',14), title('h=0,1'),
ylabel('Дрейф '), xlabel('\epsilon, градусы ')
legend('Noexp','Exp-A')
subplot(1,2,2),
plot(eps,DL001,'ro','LineWidth',3),grid
set(gca, 'FontSize',14), title('h=0,1'), xla-
bel('\epsilon, градусы '), legend('Exp-L')
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
om=1; am=0.1; k=om*am^2;
h=[1 0.9 0.8 0.5 0.2 0.1 ...
0.08 0.05 0.02 0.01 0.005 0.001]; mu=om*h;
```

```
dlt=[1.45e-4 9.7e-5 6.16e-5 9.82e-6 2.57e-7 1.61e-
8 ... 6.61e-9 1.01e-9 2.58e-11 1.61e-12 1.01e-13
1.62e-16];
Dlt=abs(dlt)/k;
h2=[1 0.9 0.8 0.5 0.2 0.1 ...
0.08 0.07 0.06 0.05 0.02 0.01 0.005 0.001];
mu2=om*h2;
dltL=[1.55e-4 8.83e-5 4.62e-5 3.15e-6 1.26e-8
1.18e-10 ... 1.51e-11 6.69e-13 -3.43e-12 -3.19e-12
1.58e-13 -1.05e-14 -6.69e-16 -1.21e-18];
DltL=abs(dltL)/k;
h1=[1 5e-1 1e-1 5e-2 1e-2 5e-3 1e-3];
mu1=om*h1;
O2hA=[-1.45e-4 -9.86e-6 -1.62e-8 -1.01e-9 -6.45e-
12 -7.8e-13 -6.24e-15];
figure,
loglog(mu,Dlt,'s-',mu1,abs(O2hA)/k,'^--
',mu2,DltL,'o','LineWidth',3), grid
set(gca, 'FontSize',16),
title(' Двухшаговые алгоритмы')
ylabel('\delta'), xlabel('\mu =\omega h'),
legend('Noexp','Exp-A','Exp-L',4)
```

Зависимости дрейфов погрешности от сдвига фаз между колебаниями основания, полученные в результате моделирования, приведены на рис. 3 (при шаге опроса измерителей $h = 0,1$ с) и при $h = 0,01$ с – на рис. 4.

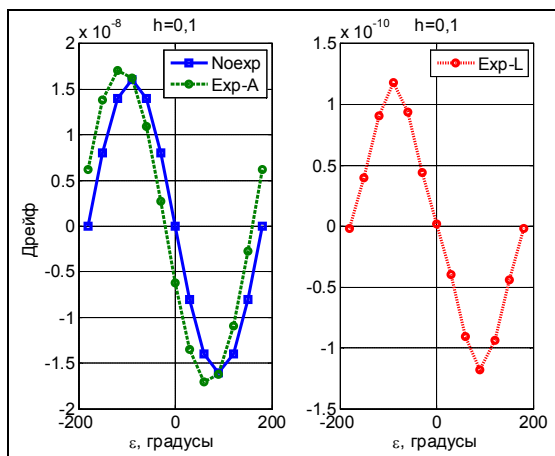


Рис. 3. Зависимости дрейфов от сдвига фаз при шаге опроса $h=0,1$ с

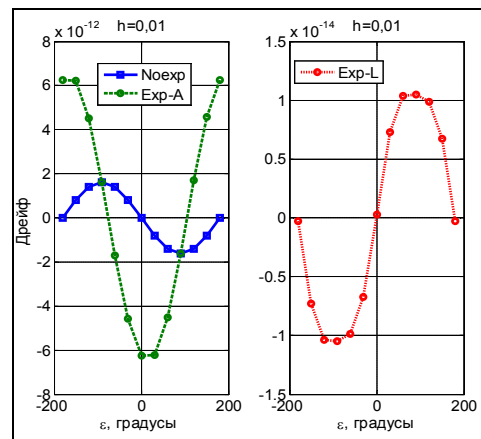


Рис. 4. Зависимости дрейфов от сдвига фаз при шаге опроса $h=0,01$ с

Таблица 1. Максимальные по величине дрейфы

Шаг опроса h, с	Максимальные по величине дрейфы					
	Алгоритм Noexp		Алгоритм Exp_A		Алгоритм Exp_L	
	1/с	°/час	1/с	°/час	1/с	°/час
1	-1,45e-4	-29,9	-1,45e-4	-29,9	-1,55e-4	-32
0,5	-9,82e-6	-2,03	-9,86e-6	-2,034	-3,15e-6	-0,65
0,1	-1,61e-8	-3,32e-3	-1,62e-8	-3,34e-3	-1,18e-10	-2,43e-5
0,05	-1,01e-9	-2,08e-4	-1,01e-9	-2,08e-4	3,19e-12	6,58e-7
0,01	-1,61e-12	-3,32e-7	-6,45e-12	-1,33e-6	1,05e-14	2,17e-9
0,005	-1,01e-13	-2,08e-8	-7,8e-13	-1,61e-7	6,69e-16	1,38e-10
0,001	-1,62e-16	-3,33e-11	-6,24 e-15	-1,29e-9	8,3e-19	1,71e-13

Графики рисунка 5 представляют зависимости безразмерного максимального дрейфа исследованных алгоритмов от частотного параметра, построенные на основе выше приведенной таблицы.

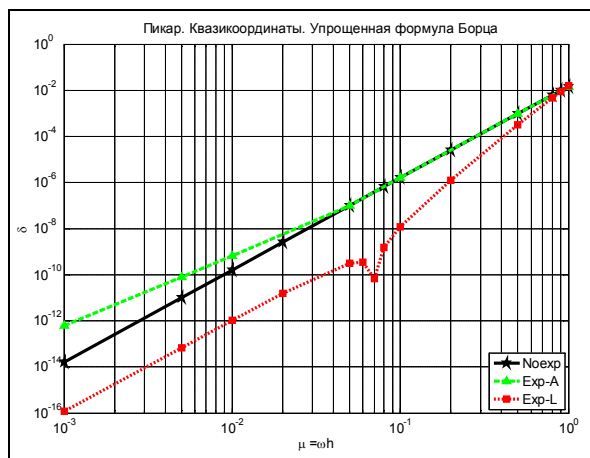


Рис. 5. Зависимости дрейфа погрешности от частотного параметра в безразмерной форме

Из графиков становятся очевидными следующие свойства исследуемых алгоритмов:

- в области больших значений частотного параметра ($1 > \mu > 0,07$) алгоритм Exp_A имеет ту же точность ($N = 4$), что и исходный, а алгоритм Exp_L обладает точностью на 2 порядка большей ($N = 6$);
- в области же малых значений частотного параметра ($0,07 > \mu > 0,001$) алгоритм Exp_A имеет третий порядок точности ($N = 3$), а алгоритм Exp_L – четвертый ($N = 4$);
- при $\mu \approx 0,07$ амплитуда дрейфа алгоритма Exp_L становится исчезающе малой, что говорит о наличии частоты колебаний основания, при которой дрейф погрешности практически отсутствует (при любых значениях сдвига фазы).

В табл. 2 приведены значения параметров точности, аппроксимирующие эти зависимости степенными функциями.

Таблица 2. Параметры точности алгоритмов

Алгоритм	Диапазон частотного параметра	N	k
Noexp	$1 > \mu > 0,001$	4	$1,61e-2$
Exp_A	$1 > \mu > 0,07$	4	$1,61e-2$
	$0,07 > \mu > 0,001$	3	$6,24e-4$
Exp_L	$1 > \mu > 0,07$	6	$1,6e-2$
	$0,07 > \mu > 0,001$	4	$1,6e-4$

Выводы

1. Использование дополнительного члена в уравнении ориентации не всегда приводит к повышению точности по сравнению с алгоритмами, использующими упрощенную форму уравнения ориентации. Например, в случае алгоритма Exp_A, наоборот, точность ухудшается в области малых значений частотного параметра. Однако, использование алгоритма Exp_L приводит к существенному повышению точности (на два порядка) в области малых значений частотного параметра.

2. Если в исходном алгоритме (и в алгоритме Exp_L) максимальные дрейфы наблюдаются всегда при коническом движении ($\varepsilon = 90^\circ$), то в алгоритме Exp_A максимумы дрейфов приходятся на значения сдвигов фаз, значительно зависящих от частотного параметра в области $0,07 > \mu > 0,001$.

3. Резюмируя, можно утверждать, что использование "расширенного" алгоритма, учитывающего третье слагаемое в уравнении Борца, приводит: а) к ухудшению точности по сравнению с более простым алгоритмом, в котором не учитывается третье слагаемое; б) к значительному увеличению числа вычислительных операций (а, значит, и затрат времени) на шаге интегрирования.

4. Наиболее точным из рассмотренных двухшаговых алгоритмов является алгоритм Exp_L.

Литература

- [1] А. Панов, *Математические основы теории инерциальной ориентации*. Киев, Украина: Наукова думка, 1995.
- [2] Ю. Лазарев, П. Аксененко, и С. Мураховский, "Исследование точности алгоритмов БИСО", *Вісник НТУУ "КПІ". Серія Приладобудування*, Вип. 52(2), с. 10-15, 2016. DOI: 10.20535/1970.52(2).2016.92739
- [3] Ю. Лазарев, и П. Мироненко, "Сравнение точности некоторых алгоритмов бесплатформенных инерциальных систем ориентации", *Вісник НТУУ "КПІ". Серія Приладобудування*, Вип. 53(1), с. 5-10, 2017. DOI: 10.20535/1970.53(1).2017.106547
- [4] В. Деменков, Ю. Кузнецов, и А. Панов, "Оценка эталонными моделями вращения алгоритмов ориентации в ненормированных кватернионах бесплатформенных навигационных систем", на *17-й междунар. конф. по автоматическому управлению «Автоматика – 2010»*, Харьков, 2010, с. 45-47.
- [5] Г. Чесноков, и А. Голубев, "Бесплатформенные инерциальные навигационные системы для современной авиации", на *X Санкт-Петербургской междунар. конф. по интегрированным навигационным системам*, СП(6), 2003, с.192.
- [6] Ю. Литманович, и Дж. Марк, "Прогресс в разработке алгоритмов БИНС на Западе и Востоке в

- материалах Санкт-Петербургской конференции: обзор за десятилетие”, на X Санкт-Петербургской междунар. конф. по интегрированным навигационным системам, СПб, 2003, с. 250-260.
- [7] L. Huang, “A new second-order strapdown attitude algorithm”, *International Journal of Innovative Computing, Information and Control*, vol. 9, no. 8, pp. 3449-3462, Aug. 2013.
- [8] S. Q. Liu, and R. Zhu, “A Complementary Filter based on Multi-sample Rotation Vector for Attitude Estimation”, *Sensors 2018*, pp. 1-7, 2017.
- [9] О. Сапегін, і М. Норенко “Алгоритм безплатформної інерціальної системи орієнтації на лазерних гіроскопах,” *Наукові вісті НТУУ “КПІ”*, № 2, с. 108–113, 2017.
- [10] Y. Liu, H. Wang, F. Cheng, M. Wang, and X. Ni, “Improvement Method of Full-Scale Euler Angles Attitude Algorithm for Tail-Sitting Aircraft,” Springer, Singapore, 2018, pp. 257–269.
- [11] Y. Wu, “Next-Generation Inertial Navigation Computation Based on Functional Iteration,” *CoRR*, vol. abs/1905.1, 2019.
- [12] Y. Wu, and Y. A. Litmanovich, “Strapdown Attitude Computation: Functional Iterative Integration versus Taylor Series Expansion,” Sep. 2019.

УДК 629.051

Ю. Ф. Лазарєв, В. В. Аврутов, П. С. Мироненко*Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна***ПРО ТОЧНІСТЬ ДЕЯКИХ "РОЗШИРЕНИХ" АЛГОРИТМІВ БЕЗПЛАТФОРМОВИХ ІНЕРЦІАЛЬНИХ СИСТЕМ ОРІЄНТАЦІЇ**

Вступ. Основною проблемою при розробці алгоритмів безплатформових інерціальних систем орієнтації є підвищення їх точності. Більшість алгоритмів, наведених у відомій літературі (див., наприклад, [1, 2, 3]), спираються на спрощену формулу Борця, в якій в правій частині не враховується член диференціального рівняння орієнтації з подвійним векторним добутком. Цікавим є з'ясувати, як вплине на точність алгоритму "розширення" рівняння орієнтації урахуванням відкинутого члена.

Основна частина. Методика досліджень точності алгоритмів зводиться до визначення значень двох невідомих параметрів, які характеризують точність алгоритму: порядку точності і коефіцієнта пропорційності. Такий підхід дозволяє провести моделювання лише для деяких конкретних значень амплітуди і частоти коливань підстави, а отримані результати узагальнити на будь-які амплітуди і частоти. Оцінка ефективності розглянутих алгоритмів проводиться за допомогою порівняльного дослідження систематичної похибки відомих двокрокових алгоритмів, що спираються на вимірювання приросту квазікоординат повороту основи на кожному кроці опитування вимірювачів

Висновки. Використання додаткового члена в рівнянні орієнтації не завжди призводить до підвищення точності в порівнянні з алгоритмами, що використовують спрощену форму рівняння орієнтації. Дослідження показали, що при цьому точність погіршується в області малих значень частотного параметра. Був досліджений також алгоритм, отриманий емпіричним шляхом, використання якого призводить до суттєвого підвищення точності (на два порядки в області малих значень частотного параметра). В цілому, можна стверджувати, що використання додаткового члена в рівнянні орієнтації призводить до погіршення точності в порівнянні з більш простими алгоритмами, а також до значного збільшення обчислювальних операцій.

Ключові слова: безплатформові інерціальні системи орієнтації; дослідження точності алгоритмів; випрямний ефект.

Yu. F. Lazarev, V. V. Avrutov, P. S. Mironenko*National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine*
ABOUT THE ACCURACY OF SOME "ADVANCED" ALGORITHMS FOR STRAPDOWN INERTIAL ORIENTATION SYSTEMS

Introduction. The main problem when developing algorithms for strapdown inertial orientation systems is to increase their accuracy. Most of the algorithms cited in the well-known literature (see, for example, [1] – [4]) rely on the simplified Borets formula, in which the term on the right-hand side does not take into account the term of the differential orientation equation with a double vector product. It is of interest to find out how the "expansion" of the orientation equation will affect the accuracy of the algorithm, taking into account the discarded term.

Main part. The methodology for studying the accuracy of algorithms is reduced to determining the values of two unknown parameters that characterize the accuracy of the algorithm: the order of accuracy and the proportionality coefficient. This approach allows modeling only for some specific values of the amplitude and frequency of the base oscillations, and generalize the results to any amplitudes and frequencies. Evaluation of the effectiveness of the considered algorithms is carried out by means of a comparative study of the systematic error of the well-known two-

step algorithms, based on measurements of increments of the quasi-coordinates of the base rotation at each step of the survey of meters.

Conclusions. The use of an additional term in the orientation equation does not always lead to an increase in accuracy compared to algorithms using a simplified form of the orientation equation. Studies have shown that accuracy decreases in the region of small values of the frequency parameter. An algorithm obtained empirically was also studied, the use of which leads to a significant increase in accuracy (by two orders of magnitude in the region of small values of the frequency parameter). In general, it is possible to restore the full-term member in the regular order to the exact precision in simple procedures, as well as to the significant lower-order operation.

Keywords: strapdown inertial orientation systems; research of algorithm accuracy; rectifying effect.

*Надійшла до редакції
24 квітня 2020 року*

*Рецензовано
30 квітня 2020 року*