

УДК 681.51+629.7.05

# ВЛИЯНИЕ КОЛЕБАНИЙ НА ТОЧНОСТЬ НАЧАЛЬНОЙ ВЫСТАВКИ БИНС И СПОСОБ ЕГО НИВЕЛИРОВАНИЯ

**О.С. Овчинникова**

*Научно-производственный центр автоматики и приборостроения им. Н.А. Пилюгина*  
Россия, 117342, Москва, Введенского ул., 1  
E-mail: [olesya.poyatsika@gmail.com](mailto:olesya.poyatsika@gmail.com)

**В.Д. Дишель**

*Научно-производственный центр автоматики и приборостроения им. Н.А. Пилюгина*  
Россия, 117342, Москва, Введенского ул., 1  
E-mail: [vddishel@list.ru](mailto:vddishel@list.ru)

**Ключевые слова:** БИНС, начальная выставка, колебания, инструментальные ошибки.

**Аннотация:** Рассматривается задача автономной выставки БИНС с измерительной избыточностью. Изучено влияние инструментальных ошибок и шумов квантования датчиков на ошибку определения азимута в условиях колебаний объекта и при их отсутствии.

## 1. Введение

Рассматривается задача автономной начальной выставки бесплатформенной инерциальной навигационной системы (БИНС), которая находится на объекте большого удлинения (коэффициент удлинения порядка 10). Объект установлен вертикально, но, разумеется, с точностью до технологических ошибок установки, нижний конец его закреплен. Под воздействием разного рода возмущений (ветровых, а возможно и технологических, которые связаны, например, с отведением мачты обслуживания) объект качается, но основание остается при этом неподвижным. Вместе с объектом качается и БИНС, расположенная в верхней его части.

Исследуются и сравниваются два варианта БИНС: со структурно-измерительной избыточностью и трехосная. В качестве первой рассматривается созданная в НПЦАП им. Н.А. Пилюгина БИНС, которая имеет по 6 акселерометров и датчиков угловой скорости (ДУС), ориентированных по нормальям к граням додекаэдра [1].

Показания датчиков искажаются всеми характерными для БИНС типами ошибок. Помимо этого в них присутствует шум квантования по уровню сигнала.

В отношении последнего уместно отметить следующее. Анализ обширной литературы [2-4] и др. по различным аспектам автономной начальной выставки БИНС показывает, что вопросы влияния шума квантования оставались вне поля зрения исследователей, причем как для задач с неподвижным, так и с подвижным основанием. Особенно заметным изъян становится, когда задача решается в условиях, при которых она рассматривается в данном докладе. В невозмущенных (номинальных) условиях БИНС неподвижна, а в реальных под воздействием возмущений качается с частотой порядка 1...1,5 Гц, амплитудой до 1м. Для обсуждаемых объектов это соответствует перемен-

ной на периоде угловой скорости с диапазоном изменения на нем  $\pm 2,4$ град/с, что на два порядка превышает скорость вращения Земли, являющуюся полезным сигналом.

## 2. Исследование влияния возмущающих факторов на точность начальной выставки

### 2.1. Алгоритм начальной выставки

Алгоритм строится на сравнении измеренных по показаниям датчиков значений векторов угловой скорости  $\bar{U}_{изм}$  и кажущегося ускорения  $\dot{\bar{W}}_{изм}$  с их расчетными значениями  $\bar{U}_{расч}$  и  $\dot{\bar{W}}_{расч}$ . Последние определяются для известной точки нахождения объекта (точнее БИНС) в предположении, что объект строго вертикален, а его (а также БИНС) ориентация в азимуте совпадает с априори заданной.

В реальности же ориентация БИНС по отношению к географической системе координат (ГСК) известна с погрешностями, которые могут достигать единиц градусов.

Определим отклонение приборной системы координат (ПСК) БИНС от вертикали. Для этого полагая, что объект неподвижен, а  $\dot{\bar{W}}_{изм} = \bar{f}_{изм}$ ,  $\dot{\bar{W}}_{расч} = \bar{f}_{расч}$ , построим вектор

$$(1) \quad \bar{C} = [\bar{f}_{изм} \times \bar{f}_{расч}].$$

Далее по показаниям ДУСов построим вектор  $\bar{U}_{изм}$  вращения Земли сначала в ПСК, а затем найдем его в ГСК:  $\bar{U}_{изм}^{ГСК} = M \cdot \bar{U}_{изм}$ , где  $M$  - матрица направляющих косинусов, составленная из компонент вектора  $\bar{C}_W = \bar{C}(\dot{\bar{W}}_{изм}, \dot{\bar{W}}_{расч})$

Используя (1), положив  $\bar{f}_{изм} = \bar{U}_{изм}^{ГСК}$  и  $\bar{f}_{расч} = \bar{U}_{расч}$ , определим  $\bar{C}_U = \bar{C}(\bar{U}_{изм}^{ГСК}, \bar{U}_{расч})$ , а из вектора  $\bar{C}_U$  найдем угол  $\beta$  отклонения фактического азимута от заданного.

### 2.2. Влияние ошибок измерений чувствительных элементов

Проварьировав выражение (1) этапа горизонтирования, в полученную формулу подставим предельные (на уровне  $3\sigma$ ) ошибки акселерометров (смещение нуля  $0.0015$  м/с<sup>2</sup>, ошибка масштабного коэффициента  $0.015$  %, ошибка ориентации осей чувствительности в ПСК  $1$  угл. мин.). Тогда для наихудшей комбинации ошибок измерений всех акселерометров ошибки знания положения ПСК БИНС к плоскости горизонта составят: для избыточной БИНС  $\pm 0.5$  угл. мин., а для трехосной  $\pm 0.7$  угл. мин.

Перейдем к анализу азимутальной ошибки. Было проведено моделирование. Сначала в нем полагалось, что показания датчиков искажены только шумом квантования.

Для борьбы с этим явлением в работах [5-7] с учетом выявленных особенностей траекторного движения рассматриваемых объектов был предложен метод, в основе которого переход от разовых измерений БИНС к накапливаемым интервальным показаниям. Ввиду близости схем измерений измеряемых факторов и характеров поведения этих факторов во времени в полете и в задаче выставки БИНС на объекте с почти вертикальным стоянием можно ожидать, что способ с интервальным накоплением измерений окажется эффективным и в задаче выставки. Ниже тезис получает подтверждение.

Пусть объект находится на экваторе. Колебаний нет. Ось  $X_{пск}$  ПСК БИНС в идеале направлена по местной вертикали, а  $Y_{пск}$  и  $Z_{пск}$  - соответственно на юг и восток. Ошибки установки БИНС по отношению к ГСК составляют  $\pm 3^\circ$ .

Результаты этого моделирования приведены в таблице 1 в строках «без ошибок».

Видно, что использование накопленных показаний (длительность накопления 1500с) позволяет практически полностью избавиться от влияния шума квантования. Точность БИНС со структурно-измерительной избыточностью выше, чем трехосной. Впрочем, ошибки трехосной БИНС также пренебрежимо малы.

**Таблица 1.** Зависимость ошибки азимутальной выставки БИНС от ошибок смещения нуля отдельно каждого ДУС при наличии шума квантования

Структурная схема	Номер ДУС с ошибкой в измерениях	Ошибка выставки в азимут, угл. мин.
БИНС со структурно-измерительной избыточностью	без ошибок	2.98E-05
	ДУС1	6.00E-04
	ДУС2	4.86
	ДУС3	3.00
	ДУС4	3.01
	ДУС5	4.86
	ДУС6	0.003
Трехосная БИНС	без ошибок	0.09
	ДУС1 $\equiv$ ДУС <sub>хпск</sub> $\equiv$ ДУ <sub>сверг</sub>	0.09
	ДУС2 $\equiv$ ДУС <sub>упск</sub> $\equiv$ ДУ <sub>сюг</sub>	0.09
	ДУС3 $\equiv$ ДУС <sub>зпск</sub> $\equiv$ ДУ <sub>свосток</sub>	11.34

Очевидно, что ввиду относительно малой скорости вращения Земли наибольшее влияние на обсуждаемую ошибку должны оказывать ошибки смещения нуля ДУСов. Вклад других видов их ошибок незначителен. Малозначим и вклад ошибок горизонтирования, значения которых приведены выше.

Далее, сохраняя шум квантования у всех датчиков, в показания каждого из них периодически добавлялась ошибка смещения нуля, равная 0.05 °/ч.

Как и можно было ожидать, азимутальная ошибка зависит от величины проекции оси чувствительности ДУС на восточное направление. То есть, при одной и той же величине ошибки смещения нуля, ошибка азимута тем больше, чем ближе ориентация оси ДУС к восточному направлению. Наиболее близкими к нему являются ДУС2 и ДУС5, наиболее удаленными – ДУС1 и ДУС6. Для трехосной БИНС наибольшая ошибка имеет место у ДУС3, который направлен строго на восток (см. таблицу 1).

Для более полного сравнения двух БИНС система со структурно-измерительной избыточностью была повернута относительно вертикали так, что один из датчиков (а именно ДУС2) оказался направлен на восток. Азимутальная ошибка при этом составила 5.12', что превышает любое для данной БИНС значение, приведенное в таблице, и подтверждает выявленную зависимость. К тому же эта ошибка заметно меньше, чем у трехосной БИНС (см. последнюю строку таблицы), что еще раз свидетельствует о более высокой точности избыточной системы.

### 2.3. Влияние колебаний объекта

Пусть теперь объект совершает колебания. Для рассматриваемых условий и типов объектов колебания происходят в вертикальной плоскости, являются почти плоскими с близкими к постоянным значениями амплитуды и частоты. В окрестностях точек с нулевой угловой скоростью форма колебания близка к синусоидальной. Полагается, что в этих окрестностях она с достаточной точностью может быть аппроксимирована этой зависимостью.

На рис. 1 представлена зависимость ошибки азимутальной выставки от угла между меридиональной плоскостью и плоскостью качания, объект находится на экваторе, инструментальные ошибки отсутствуют.

Видно, что наибольшая ошибка в азимуте для обеих БИНС имеет место при качании в плоскости меридиана ( $\Delta Az = 0^\circ$ ), в то же время, если это происходит в плоскости параллели ( $\Delta Az = 90^\circ$ ), ошибка стремится к нулю. Объясняется это тем, что в первом случае угловая скорость качания направлена на восток, что создает наибольшие помехи в измерении восточной (полезной) составляющей скорости вращения Земли.

При введении в модель ошибки смещения нуля характер зависимости сохраняется. Значения же азимутальной ошибки отличаются от приведенных на рисунке 1 на величины, указанные в таблице 1.

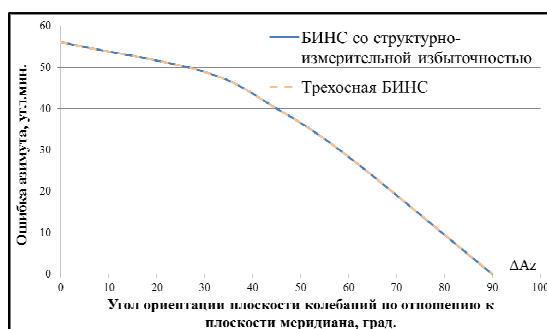


Рис. 1. Зависимость ошибки азимута от угла между меридиональной плоскостью и плоскостью колебаний объекта. Частота колебаний 1.5 Гц, амплитуда 1 м.

### 3. Компенсация влияния качаний на погрешность выставки в азимут

Алгоритм нивелирования влияния колебаний на ошибку азимутальной выставки основан на определении их параметров по результатам накапливающихся измерений и исключении после этого колебательной составляющей скорости из показаний датчиков.

Определяемыми параметрами являются частота, форма и среднее значение амплитуды. Колебания с найденными параметрами из показаний ДУС вычитаются.

Очевидно, что при идеальных измерениях и идеально найденных параметрах колебаний после вычитания остается только полезный сигнал. В действительности же, кроме полезной составляющей, остается часть составляющей угловой скорости колебаний. Для ее дальнейшей компенсации в векторе  $\bar{U}_{изм}^{Зем}$  вращения Земли найденная разность усредняется некоторое время,  $\bar{U}_{изм}^{Зем}$  далее используется при азимутальной выставке.

Для проверки качества функционирования алгоритма в модель были введены колебания с частотой 1.5 Гц и амплитудой 1 м. Их параметры полагались неизвестными. Наблюдения проводились в течение 1000 с, усреднение разности проводилось на интервале 1000 с, после чего в течение 1500 с решалась задача начальной выставки.

В таблице 2 в строках «без ошибок» представлены результаты по точности определения азимута в условиях колебаний при наличии только шума квантования.

Зависимость величины ошибки азимута от ориентации плоскости колебаний по отношению к сторонам света, представленная в разделе 2.3, сохраняется. В наихудшем случае ( $\Delta Az = 0^\circ$ ) точности избыточной БИНС оказываются вдвое выше, чем трехосной.

Далее, как и при получении результатов таблицы 1, каждому ДУС по очереди задавалась ошибка смещения нуля  $0.05^\circ/\text{ч}$ . Видно, что значения азимутальной ошибки близки к значениям таблицы 1, которые получены при отсутствии колебаний объекта. Это означает практически полную компенсацию влияния колебаний. Зависимости, которые были выявлены в разделах 2.2 и 2.3, сохраняются и в условиях колебаний.

В предположении статистической независимости ошибок ДУС были рассчитаны ошибки определения азимута при суммарном воздействии ошибок всех датчиков. Так, в худшем случае при колебаниях в плоскости меридиана ошибка выставки для избыточной БИНС составляет порядка 9 угл. мин, для трехосной – порядка 14 угл. мин.

Полученные результаты свидетельствуют об эффективной работе алгоритма.

**Таблица 2.** Зависимость ошибки азимутальной выставки БИНС от инструментальных ошибок ЧЭ и от ориентации плоскости, в которой происходят колебания объекта, полученная в результате использования алгоритма компенсации влияния колебаний. Столбец « $0^\circ$ » соответствует колебаниям в плоскости меридиана, « $90^\circ$ » – в плоскости экватора.

Структурная схема	ЧЭ с ошибкой	Угол ориентации плоскости колебаний по отношению к плоскости меридиана				
		$0^\circ$	$30^\circ$	$45^\circ$	$60^\circ$	$90^\circ$
		Ошибка выставки в азимут, угл. мин.				
БИНС со структурно-измерительной избыточностью	Без ошибок	0.93	0.81	0.12	0.08	0.01
	ДУС1	0.93	0.25	0.13	0.08	0.01
	ДУС2	5.79	5.06	4.98	4.94	4.85
	ДУС3	3.93	3.79	3.13	3.09	2.99
	ДУС4	2.78	2.89	2.89	2.93	3.02
	ДУС5	4.60	4.68	4.74	4.78	4.87
	ДУС6	0.24	0.79	0.13	0.09	0.01
Трехосная БИНС	Без ошибок	1.90	1.70	0.87	0.91	0.09
	ДУС1 $\equiv$ ДУС <sub>ХПС</sub> к $\equiv$ ДУС <sub>верт</sub>	1.90	1.71	0.87	0.91	0.09
	ДУС2 $\equiv$ ДУС <sub>УПС</sub> к $\equiv$ ДУС <sub>юг</sub>	1.90	1.71	0.87	0.91	0.09
	ДУС3 $\equiv$ ДУС <sub>ЗПС</sub> к $\equiv$ ДУС <sub>восток</sub>	13.99	13.06	11.76	12.64	11.35

## 4. Выводы

Рассмотрена задача начальной выставки БИНС на качающемся объекте, отмечены ее особенности и отличия от других постановок задач выставки.

Подтверждена эффективность применения метода с интервальным накоплением измерений в рассматриваемой постановке задачи выставки, что позволило, в числе прочего, устранить влияние шума квантования.

Показано, что:

- наиболее неблагоприятными при определении азимута являются колебания объекта в меридиональной плоскости;
- погрешности измерений ДУСов, оси которых ориентированы в восточном направлении, приводят к наибольшим ошибкам азимутальной выставки;
- предложенный алгоритм эффективно компенсирует влияние колебаний.

## Список литературы

1. Дишель В.Д., Межирицкий Е.Л., Немкевич В.А, Сулимов В.Г, Деревянкин А.В. Принципы обеспечения отказоустойчивости при додекаэдроизбыточной структуре БИБ // Труды МНТК «Системы и комплексы автоматического управления ЛА, посвященной 105-ю с дня рождения акад. Н.А. Пилюгина». Москва, 2013 / Под общ. ред. акад. РАН Васильева С.Н. М.: Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, 2013. С. 72-83.
2. Липтон А. Выставка инерциальных систем на подвижном основании. М.: Наука, 1971. 168 с.
3. Salychev O. Applied Inertial Navigation: Problems and Solutions. Moscow: BMSTU Press, 2004. 304 p.
4. Titterton D.H., Weston J.L. Strapdown Inertial Navigation Technology / 2<sup>nd</sup> Ed. The Institution of Electrical Engineers, 2004. 581 p.
5. Дишель В.Д., Межирицкий Е.Л., Овчинникова О.С., Быков А.К., Соколова Н.В. Технология интервально-динамического оценивания и ее развитие применительно к задачам БИНС со структурно-измерительной избыточностью // Труды ФГУП НПЦ АП. 2018. № 1. С. 7-29.
6. Дишель В.Д., Межирицкий Е.Л., Пояцька (Овчинникова) О.С., Соколова Н.В. Технология интервально-динамического оценивания и идентификации как средство повышения точности СУ средств выведения // XXV МК ИНС. СПб.: АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2018. С. 53-63.
7. Пояцька (Овчинникова) О.С. Идентификация некондиционных инерциальных измерителей в составе избыточного БИБ // VIII НТК молодых ученых. М.: ФГУП «НПЦАП», 2018. С. 151-153.