

Ю. Г. ЕГОРОВ, Г. Ю. КИРЯЧЕНКО, Е. А. ПОПОВ

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОГРАММ СКАЛЯРНОЙ КАЛИБРОВКИ ВЕКТОРНОГО ИЗМЕРИТЕЛЯ

В статье продолжено изучение особенностей скалярной калибровки. Обобщены и проанализированы известные программы калибровки, сравниваются аналитические метрики оценок, получаемых в результате применения программ, сгенерированных при помощи различных целевых функций в предположении о нормальном распределении погрешностей измерений. В статье также делаются выводы о целесообразности оптимизации программ калибровки и общих закономерностях при их синтезе.

Ключевые слова: калибровка, векторный измеритель.

Введение

В системах навигации и управления широко применяются акселерометры, датчики угловых скоростей и магнитометры. Эти приборы, как правило, объединяют в блоки так, чтобы они измеряли проекции соответствующих векторных физических величин (кажущегося ускорения, абсолютной угловой скорости, магнитной индукции) на приборную систему координат.

В работе [1] для обобщения упомянутых устройств было предложено воспользоваться понятием «векторный измеритель» (ВИ), который обладает погрешностями, как присущими другим средствам измерения (аддитивные и мультипликативные составляющие), так и связанными с векторной природой измеряемой величины. Статистическая составляющая этих погрешностей оценивается в ходе специальной процедуры – калибровки [2], которая проводится как на стендах [3–21] при производстве, так и в рабочих условиях в составе объекта управления [22, 23].

Анализ публикаций позволяет утверждать, что для ВИ может быть применена скалярная (инвариантная) калибровка. Основная особенность этого подхода заключается в том, что за счет перехода от измеренных проекций к абсолютному значению векторной физической величины удается сократить влияние погрешностей, вызванных неидеальностью испытательного оборудования [1, 4, 9, 10]. Наиболее широко скалярная калибровка применяется к блокам акселерометров [4, 7–10, 14, 16, 18] и магнитометров [5, 6, 15, 17–19, 21–23]. Калибровка таким способом блоков ДУС хоть и была описана в [10], но на практике встречается редко, так как в стационарных положениях измеряемым является вектор угловой скорости вращения Земли,

Егоров Юрий Григорьевич. Доктор технических наук, профессор, МГТУ им. Н.Э. Баумана (Москва). Действительный член международной общественной организации «Академия навигации и управления движением».

Киряченко Григорий Юрьевич. Инженер, АО «Центральный научно-исследовательский институт автоматики и гидравлики» (Москва).

Попов Евгений Александрович. Кандидат технических наук. Член секции молодых ученых международной общественной организации «Академия навигации и управления движением».

имеющий достаточно малую величину. Это, впрочем, не ограничивает использование скалярной методики в тех случаях, когда измеряемый вектор задается другим способом (например, с помощью вращения платформы станда).

Качество получаемых в ходе калибровки параметров (дисперсия и взаимная корреляция) зависит от выбора как алгоритма обработки измерений и оценивания [1, 9, 14], так и измерительных положений (ИП) [3, 9, 10, 12–14, 16]. Набор ИП, обеспечивающий разрешимость задачи оценивания (невырожденность информационной матрицы), будем называть «программой калибровки».

В ходе скалярной калибровки могут быть использованы различные программы. Самой распространенной, судя по публикациям, является программа из 18 ИП, в которой каждая ось ВИ по одному разу занимает положение по направлению измеряемого вектора и против него и еще по четыре – положение для каждой пары осей под 45° к этому вектору (рис. 1). Эта программа должна обеспечивать гарантированно минимальную погрешность оценки при условии ограниченности погрешности измерений [14].

Для 18 положений предлагались и другие программы, например такая, где каждая пара осей занимает по 6 равномерно распределенных положений при повороте вокруг третьей оси, ортогональной измеряемому вектору [12] (рис. 2).

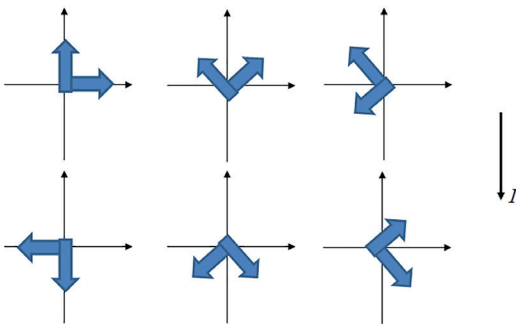


Рис. 1. Измерительные положения (6 из 18) для программы калибровки из [14]

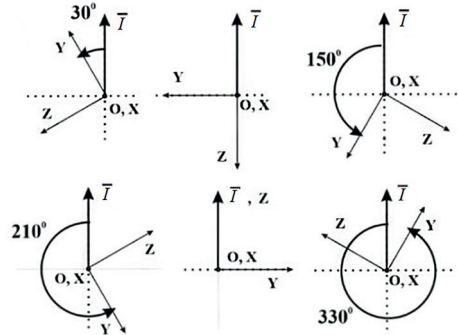


Рис. 2. Измерительные положения (6 из 18) для программы калибровки из [12]

Минимальное количество измерительных положений равно 9, что соответствует количеству оцениваемых параметров. Для программ из 9 положений предлагалось брать за основу положения по измеряемому вектору и против него либо дополнять их тремя положениями, в которых измеряемый вектор проецируется на две [8, 14] или три [13] оси прибора. Необходимо заметить, что в отличие от 18 положений в данном случае уже ни о какой оптимальности речи не шло. В [16] для формирования программы калибровки из 9 ИП был предложен подход, улучшающий обусловленность в задаче оценивания.

В нашей предыдущей работе [3] были приведены результаты синтеза программ калибровки численными методами (в условиях нормального закона распределения погрешностей измерений) и их краткое сравнение с другими программами калибровки. В качестве целевой функции Ξ для оптимизации был выбран один из распространенных критериев в задачах планирования эксперимента [24] – D -критерий – определитель обратной информационной матрицы K , который также называют обобщенной дисперсией:

$$\Xi = \Xi_D = \det(K). \tag{1}$$

В настоящей статье более подробно сравниваются программы калибровки, полученные различными методами (аналитическими и численными) и по различным критериям: следу матрицы $K \Xi_A = \text{trace}(K)$ (А-критерий), ее собственным значениям $\Xi_E = \max(\lambda_K)$ (Е-критерий) и максимальному значению ее диагонального элемента $\Xi_\sigma = \max_r(K(r, r))$.

Все это позволит в дальнейшем более разумно подходить к выбору ИП при проектировании методик калибровки, основанных на скалярном подходе.

Объект исследования

Векторный измеритель

В статье рассматриваются только неизбыточные (состоящие из трех первичных измерителей) ВИ с ортогональной компоновкой (рис. 3), при которой оси чувствительности первичных измерителей номинально направлены вдоль приборных осей XYZ.

Базовая модель измерений ВИ может быть представлена в следующем виде:

$$\hat{I} = \bar{\Delta} + (E + \delta K) \cdot \Phi \cdot \bar{I} + \bar{\omega}, \quad (2)$$

где \bar{I} – измеряемый вектор; E – единичная матрица 3×3 ; $\delta K = \text{diag}([\delta k_x \ \delta k_y \ \delta k_z])$ – матрица отклонений масштабных коэффициентов; $\bar{\Delta} = (\Delta_x \ \Delta_y \ \Delta_z)^T$ – вектор смещений нулевых сигналов; $\bar{\omega} = (\omega_x \ \omega_y \ \omega_z)^T$ – вектор случайных составляющих измерений; Φ – матрица направляющих косинусов, описывающая отклонение осей чувствительности от приборной системы координат:

$$\Phi = \begin{pmatrix} \sqrt{1 - \varphi_{xy}^2 - \varphi_{xz}^2} & \varphi_{xy} & \varphi_{xz} \\ \varphi_{yx} & \sqrt{1 - \varphi_{yx}^2 - \varphi_{yz}^2} & \varphi_{yz} \\ \varphi_{zx} & \varphi_{zy} & \sqrt{1 - \varphi_{zx}^2 - \varphi_{zy}^2} \end{pmatrix}.$$

Ориентацию измеряемого вектора относительно приборной системы координат будем описывать с помощью направляющих косинусов $\bar{\eta} = \frac{\bar{I}}{|\bar{I}|} = (\eta_x \ \eta_y \ \eta_z)^T$.

Будем считать случайные составляющие измерений ω_j несмещенными независимыми случайными величинами, имеющими нормальный закон распределения и дисперсию σ_ω^2 , а параметры Δ , δk , φ – постоянными во времени.

Скалярная калибровка

Как уже было сказано выше, при использовании скалярной калибровки осуществляется переход от измеренных проекций к модулю измеряемой величины $m = |\bar{I}|$. Модуль может быть рассчитан либо как корень из суммы квадратов проекций [1, 4, 9, 10]

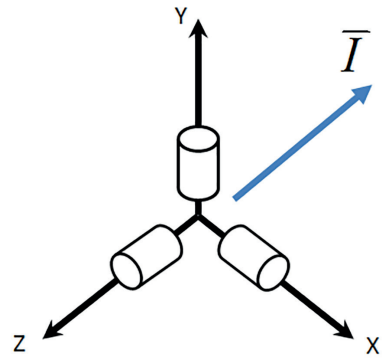


Рис. 3. Векторный измеритель и измеряемый вектор I

$$m_I = \sqrt{\hat{I}_x^2 + \hat{I}_y^2 + \hat{I}_z^2}, \quad (3)$$

либо как скалярное произведение [1, 13]

$$m_{II} = \hat{I} \cdot \bar{\eta}_d. \quad (4)$$

При этом невязку модуля $J = \frac{m}{|\bar{I}|} - 1$ можно приближенно представить в линейном виде:

$$\bar{J} \approx H\bar{X} + \bar{S}, \quad (5)$$

где $\bar{X} = (\bar{\Delta}_x, \bar{\Delta}_y, \bar{\Delta}_z, \delta k_x, \delta k_y, \delta k_z, \gamma_{xy}, \gamma_{yz}, \gamma_{zx})^T$ – вектор оцениваемых параметров; $\gamma_{kj} = \varphi_{kj} + \varphi_{jk}$ ($k, j = x, y, z$) – углы неортогональности;

$\bar{\Delta}_j = \frac{\Delta_j}{|\bar{I}|}$ – нормированные по модулю измеряемого вектора значения смещения нулевых сигналов;

$H = \{h_i\}_{i=1\dots N}$ – матрица измерений, каждая строчка которой зависит от направляющих косинусов $\bar{\eta}_i$ в i -м измерительном положении:

$$h_i = (\eta_{xi}, \eta_{yi}, \eta_{zi}, \eta_{xi}^2, \eta_{yi}^2, \eta_{zi}^2, \eta_{xi}\eta_{yi}, \eta_{yi}\eta_{zi}, \eta_{zi}\eta_{xi});$$

N – количество измерительных положений; \bar{S} – случайная составляющая невязки.

Оценки параметров ВИ могут быть получены различными способами [1, 8, 14, 23], например с помощью метода наименьших квадратов (МНК)

$$\hat{\bar{X}} = KH^T \bar{J} \quad (6)$$

где $K = (H^T H)^{-1}$ – обратная информационная матрица.

Так как (6) является линейным приближением, получение оценок обычно осуществляется итерационно [1, 8, 9, 11, 14, 15]. При этом на каждом шаге в измерениях компенсируются оцененные параметры, полученные на предыдущем шаге.

Сравнение программ калибровки

На графике (рис. 4) представлены три класса программ калибровки. Зелеными квадратами обозначены программы, в которых измеряемый вектор проецируется на одну, две или три оси равномерно (используются положения, при которых проекции η_j могут принимать только значения $1, \sqrt{2}/2$ и $\sqrt{3}/3$ соответственно). Звездочками обозначены программы, полученные вращением вокруг оси, ортогональной измеряемому вектору (аналогично приведенным на рис. 2), треугольниками – численно оптимизированные программы [3]. Кроме того, на графике показаны значения для программ, соответствующих оснасткам в виде додекаэдра и икосаэдра (оснастка, в которую устанавливается ВИ, затем кантуется на плоскости, ортогональной измеряемому вектору [25]). Дополнительно мы сгенерировали программы с выбранными случайным образом положениями и отметили пунктирной линией лучшие значения, полученные на выборке из ста тысяч программ.

Видно, что с ростом числа измерительных положений N обобщенная дисперсия уменьшается для всех классов программ, причем кажется, что убывает она с одинаковой скоростью.

В этом можно убедиться благодаря графику нормированной обобщенной дисперсии (рис. 5). Здесь она умножена на количество измерительных положений в

девятой степени. Если считать, что среднев квадратическое отклонение случайной составляющей измерений убывает пропорционально корню из времени осреднения в одном положении, то программы с равным значением этого параметра могут быть взаимозаменяемы при условии пропорционального изменения времени осреднения. Например, программу из 36 положений можно заменить на программу из 18, но в каждом положении нужно будет накапливать измерения в два раза дольше.

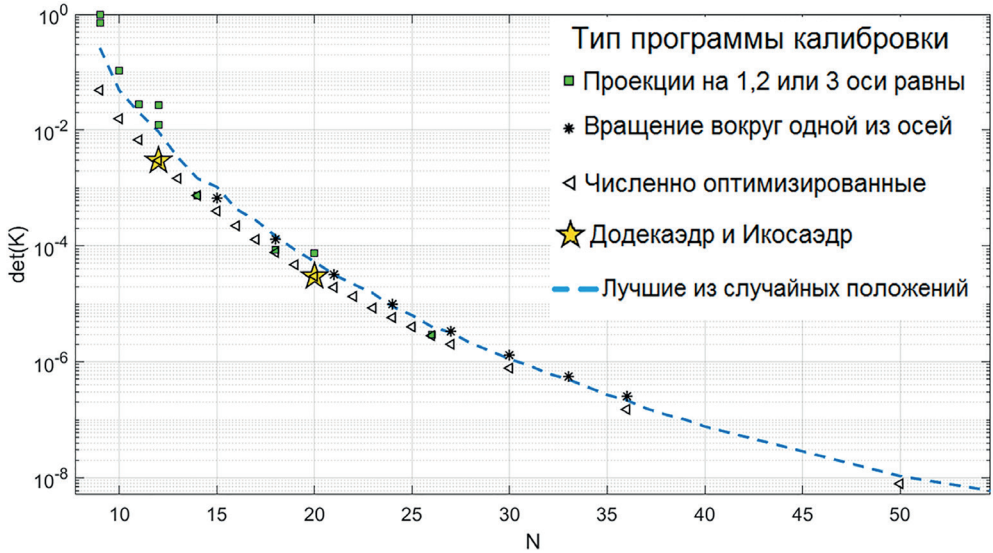


Рис. 4. Обобщенная дисперсия

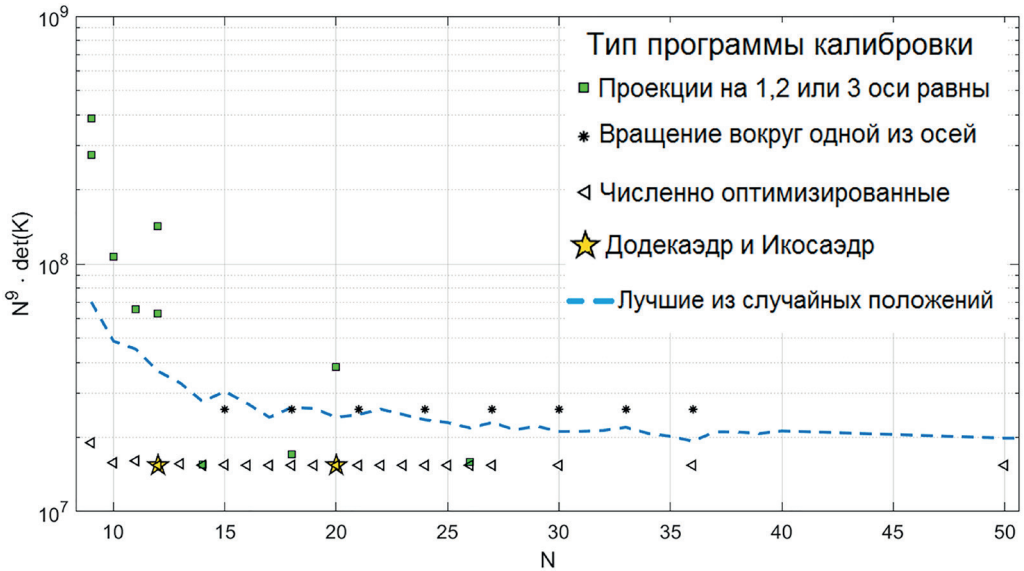


Рис. 5. Обобщенная дисперсия, нормированная по количеству измерительных положений

Более подробно нижняя граница нормированных значений представлена на рис. 6. Видно, что существует предел $N^9 \cdot \det(K) = 1,538 \cdot 10^7$, который достигается большинством оптимизированных программ, но для $N = 9, 10, 11, 13, 15$ оптимизация не позволяет достигнуть этого значения.

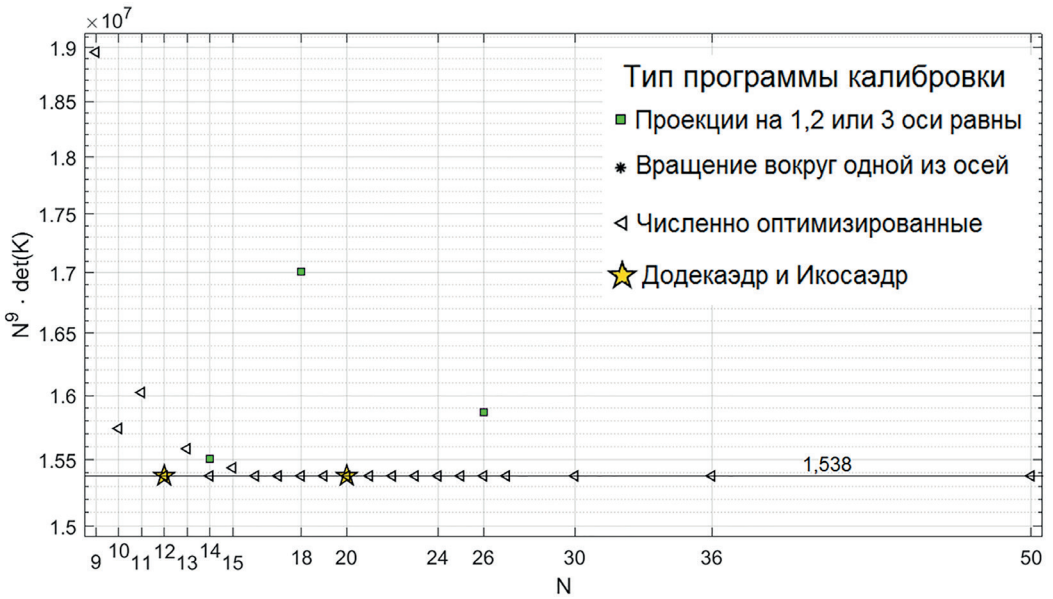


Рис. 6. Обобщенная дисперсия, нормированная по количеству измерительных положений. Нижняя граница

Заметим также, что значения обобщенной дисперсии для программ из 12 и 20 положений, полученных численной оптимизацией, совпадают со значениями для симметричных программ (додекаэдр и икосаэдр), но сами измерительные положения не формируют соответствующих симметричных фигур.

Что касается «наивного» подхода генерации положений случайным образом, то хотя при этом не обеспечивается оптимальное значение обобщенной дисперсии D , видно, что оно уменьшается с ростом количества ИП.

Вышеизложенное подтверждает очевидный факт: чем меньше количество ИП, тем важнее их выбор и осуществление оптимизации программы калибровки.

Чтобы более подробно сравнить программы калибровки, кроме самого значения целевой функции Ξ мы посчитали приведенные дополнительные параметры $\theta_\Delta, \theta_{\delta k}, \theta_\gamma$, которые соответствуют среднеквадратической погрешности (СКП) оценки соответствующего параметра, нормированного по значению СКП шума:

$$\theta_q = \max \sqrt{K(r, r)}. \tag{7}$$

Из рис. 7 видно, что наиболее точно будут определяться смещения нуля, а наименее точно – неортогональности. При этом можно утверждать, что для программ, у которых больше погрешность оценки масштабных коэффициентов, меньше погрешность оценки неортогональностей и наоборот. Это очень характерно проявляется для программы из 20 положений.

В результате, чтобы решить, по какому критерию оптимизировать положения, сначала необходимо определиться с тем, точность каких параметров важнее. А это, в свою очередь, будет зависеть от назначения и условий применения векторного измерителя, поэтому вопрос о выборе программы калибровки не может быть решен единственным способом.

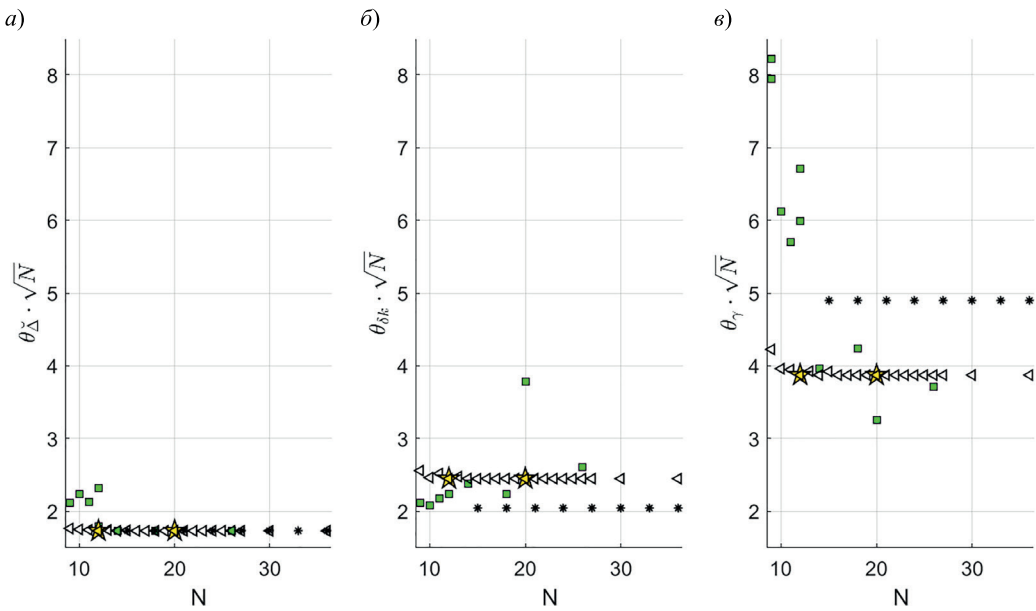


Рис. 7. Теоретические значения нормированных среднеквадратических погрешностей ВИ: смещений нулевых сигналов (а), отклонений масштабных коэффициентов (б) и неортогональностей (в)

Так как СКП оценки углов неортогональности в среднем больше, чем оценки отклонения масштабного коэффициента, то алгоритмы численной оптимизации в приведенной выше формулировке стремятся снизить ее в первую очередь, что и определяет разницу между этим классом программ калибровки относительно остальных (полученных не численной оптимизацией).

Следует также отметить, что нормированная СКП смещения нулевого сигнала θ_{Δ} практически не зависит от выбора программы калибровки при $N > 15$.

Оптимизация по другим критериям

Как было показано в [3], для синтеза программ калибровки могут быть выбраны и другие критерии, благодаря которым формируются программы, обеспечивающие различные свойства оценок параметров ВИ.

В теории планирования эксперимента [24] кроме D -критерия, где в качестве целевой функции выступает обобщенная дисперсия, широко востребованы и другие критерии, которые также предполагают применение в качестве целевых функций метрик, получаемых на основе информационной матрицы K . В настоящей работе приводятся результаты использования в качестве целевой функции следа матрицы K (A -критерий), ее собственных значений (E -критерий) и максимума из ее диагональных элементов.

Полученные программы из 18 ИП приведены в табл. 1–3.

На рис. 8 приведены значения СКП оценки параметров ВИ, нормированных по количеству ИП, для программ из 18 и 9 ИП. Программы расположены слева направо в порядке убывания СКП неортогональностей.

Таблица 1

Программа калибровки из 18 ИП (Ξ_A)

№ИП	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$\alpha_1, ^\circ$	-151,1	48,6	-127,8	-73,1	72,5	-38,8	114,9	127,4	108,6
$\alpha_2, ^\circ$	-69,8	-34,1	16,2	-0,9	63,4	-28,3	37,9	-14,2	-44,0
№ИП	10	11	12	13	14	15	16	17	18
$\alpha_1, ^\circ$	61,4	19,1	-5,4	-114,9	164,6	-144,6	-62,5	-24,8	-170,8
$\alpha_2, ^\circ$	9,7	16,6	-50,1	-33,3	20,6	49,0	55,6	29,1	-24,6

Таблица 2

Программа калибровки из 18 ИП (Ξ_E)

№ИП	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$\alpha_1, ^\circ$	27,3	-167,1	-33,6	-81,3	-124,5	-130,6	125,8	-75,1	-31,4
$\alpha_2, ^\circ$	54,4	-45,9	-49,1	29,7	-15,0	58,5	44,1	-31,8	3,5
№ИП	10	11	12	13	14	15	16	17	18
$\alpha_1, ^\circ$	46,8	156,6	122,7	71,3	55,6	-156,9	161,6	-55,9	31,9
$\alpha_2, ^\circ$	-52,1	17,6	-17,7	34,2	-19,2	23,1	-47,6	35,4	8,3

Таблица 3

Программа калибровки из 18 ИП (Ξ_B)

№ИП	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$\alpha_1, ^\circ$	-147,6	74,7	-120,2	-147,3	19,1	135,9	-148,3	-61,9	-71,5
$\alpha_2, ^\circ$	-44,8	32,1	21,7	-15,0	-44,0	-50,7	49,7	23,2	-39,6
№ИП	10	11	12	13	14	15	16	17	18
$\alpha_1, ^\circ$	44,6	133,4	-37,6	36,6	-38,7	-19,5	50,1	148,2	80,7
$\alpha_2, ^\circ$	-21,2	-1,4	-33,3	23,6	46,9	22,2	60,5	35,8	-40,6

Помимо синтезированных на графики добавлены программы, сформированные аналитическими способами. Так, на рис. 8, *a* первой в ряду показана программа калибровки [12], в которой ИП выбираются путем поворота ВИ вокруг одной из осей на 60° . Далее следует программа из [14], в которой положения располагаются под 45° . На рис. 8, *b* первой представлена программа [13], в которой измеряемый вектор проецируется равномерно на все три оси ВИ (проекции при этом равны $\frac{\sqrt{3}}{3}$), затем – программа, полученная в [14] путем исключения части ИП в программе из 18 ИП.

В целом представленные значения СКП подтверждают полученный в предыдущем разделе вывод о том, что выбор программы калибровки будет в основном влиять на соотношение между погрешностями оценки масштабных коэффициентов и углов неортогональностей.

С целью дальнейшего сравнения полученных результатов поясним разницу между перечисленными критериями. Для этого введем ряд упрощений и воспользуемся геометрической аналогией.

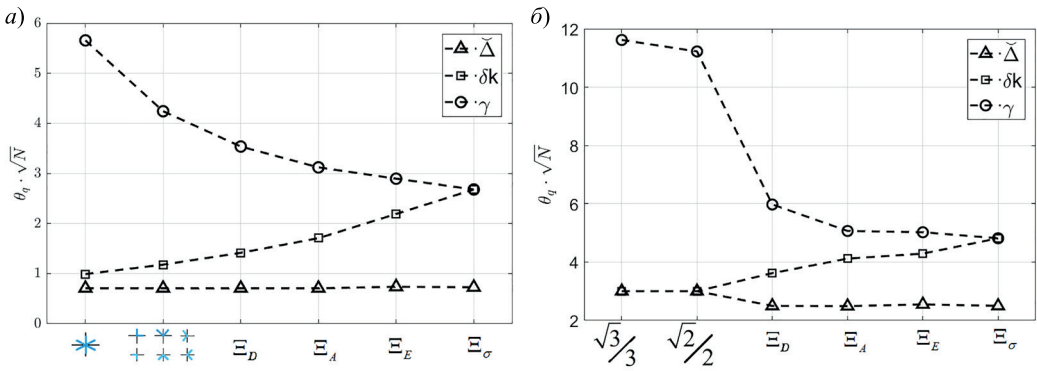


Рис. 8. Теоретические значения нормированных СКП оценки параметров ВИ при оптимизации по различным критериям программы из 18 ИП (а) и 9 ИП (б)

Совместное распределение погрешностей оценок вектора \hat{X} можно представить в виде эллипсоида в 9-мерном пространстве. Вместе с тем из графиков соотношения параметров θ_q (рис. 7, 8) видно, что погрешность оценки нормированного смещения нулевого сигнала практически не изменяется от выбора критерия. Ввиду этого с учетом симметричности ВИ для анализа можно ограничиться проекцией рассматриваемого эллипсоида на плоскость $\delta k - \gamma$, которая представляет собой соответствующий эллипс (рис. 9).

Так, при выборе D -критерия оптимизация будет вестись по уменьшению функции $\Xi_D = \det(K)$, что в нашем упрощенном представлении соответствует уменьшению площади эллипса. Это должно обеспечить одновременно уменьшение погрешностей оценок параметров ВИ и их коррелированности.

При выборе A -критерия $\Xi_A = \text{trace}(K)$. В упрощенном представлении это будет соответствовать сокращению отрезка между точками пересечения эллипса и осей координат $\sigma_{\delta k}^2 + \sigma_{\gamma}^2$, что должно снизить уровень погрешностей без учета их коррелированности.

Оптимизация по E -критерию ($\Xi_E = \max(\lambda_k)$) соответствует уменьшению наибольшей из полуосей эллипса и, как следствие, делает максимальную погрешность минимальной с учетом корреляции. При выборе же $\Xi_{\sigma} = \max(K(r, r))$ учета корреляции не будет, что и видно на графиках (рис. 8), где этому критерию оптимизации соответствуют одинаковые значения $\theta_{\delta k}$ и θ_{γ} .

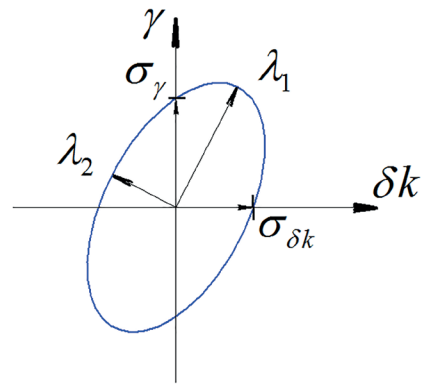


Рис. 9. Иллюстрация эллипса погрешностей

Заключение

В статье в отличие от [3] более подробно сравниваются различные программы калибровки ВИ. Кроме этого, приводятся результаты синтеза программ калибровки для 9 и 18 ИП, анализ которых подтвердил наблюдавшиеся ранее закономерности.

В качестве обобщающих выводов можно перечислить следующие:

- 1) чем меньше ИП, тем большее значение имеет их выбор и тем важнее проводить оптимизацию;

- 2) для программ с одинаковым количеством ИП выбор критерия оптимизации будет влиять в основном на соотношение между дисперсией погрешностей оценок отклонения масштабного коэффициента δk и углов неортогональности γ .

Было получено также предельное значение для обобщенной дисперсии ($1,538 \cdot 10^7$), приведенной по количеству ИП, к которому стремятся значения этой величины при оптимизации. Получение этой величины аналитически может служить дальнейшим этапом анализа скалярной калибровки.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Егоров Ю.Г., Попов Е.А.** Анализ погрешностей скалярной калибровки векторного измерителя // Гироскопия и навигация. 2020. Т. 28. №4 (111). С. 37–52.
2. **ГОСТ Р 8.879-2014** Методики калибровки средств измерений.
3. **Егоров Ю.Г., Киряченко Г.Ю., Попов Е.А.** Синтез субоптимальных программ калибровки блока акселерометров численными методами // Гироскопия и навигация. 2021. Т. 29 №2 (113). С. 47–58.
4. **Лакоза С.Л., Мелешко В.В.** Скалярная калибровка акселерометров низкой и средней точности // Радиооптика. 2015. №1. С. 9–28.
5. **Zikmund, A., Ripka, P.**, Scalar calibration of 3-D COIL system, *Journal of Electrical Engineering*, 2010, vol. 61, no 7/s, pp. 39–41.
6. **Василюк Н.Н.** Калибровка коэффициентов линейной модели интегрального магнитометра за счет использования измерений трехосного гироскопа // Гироскопия и навигация. 2019. Т. 27. №1 (104). С. 107–126.
7. **Wu, Q., Wu, R., Han, F., and Zhang, R.**, A three-stage accelerometer self-calibration technique for space-stable inertial navigation systems, *Sensors*, 2018, vol. 18, no. 9, 2888.
8. **Водичева Л.В., Парышева Ю.В.** Оценка точностных параметров датчиков бесплатформенного инерциального измерительного блока с помощью относительно грубого поворотного стола // Гироскопия и навигация. 2019. Т. 27. № 2 (105). С. 162–178.
9. **Измайлов Е.А., Лепе С.Н., Молчанов А.В., Поликовский Е.Ф.** Скалярный способ калибровки и балансировки бесплатформенных инерциальных навигационных систем // XV Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам. СПб.: ГНЦ РФ «ЦНИИ Электроприбор», 2008. С. 145–154.
10. **Аврутов В.В., Головач С.В., Мазепа Т.Ю.** О скалярной калибровке инерциального измерительного модуля // Сборник трудов XIX Санкт-Петербургской международной конференции по интегрированным системам. СПб., 2012. С. 113–118.
11. **Егоров Ю.Г. и др.** Итерационная процедура калибровки чувствительных элементов БИНС // Авиакосмическое приборостроение. 2018. №2. С. 3–17.
12. **Егоров Ю.Г., Дзюев А.А., Попов Е.А.** Синтез программ калибровки блока акселерометров БИНС при инвариантном подходе // Гироскопия и навигация. 2019. №1 (104). С. 61–69.
13. **Егоров Ю.Г., Попов Е.А.** Исследование минимально избыточных программ калибровки триады акселерометров // Авиакосмическое приборостроение. 2016. №6. С. 3–8.
14. **Акимов П.А., Деревянкин А.В., Матасов А.И.** Гарантирующий подход и H_1 -аппроксимация в задачах оценивания параметров БИНС при стендовых испытаниях. М.: Издательство Московского университета. 2012. 296 с.
15. **Каршаков Е.В.** Структура и алгоритмы обработки бортовых измерений в аэромагнитных и аэроэлектромагнитных системах. Дисс. ... д. т. н. 05.13.01. ФГБУН «ИПУ РАН им. Трапезникова». М., 2018.
16. **Гребенкин М.Д.** Улучшение обусловленности задачи скалярной калибровки тройки акселерометров с помощью визуализации функции эффективности калибровочных измерений // Научная визуализация. 2020. №5. С. 25–36.
17. **Bonnet, S., Bassompierre, C., Godin, C., Lesecq, S., Barraud, A.**, Calibration methods for inertial and magnetic sensors, *Sensors and Actuators A: Physical*, 2009, 156, pp. 302–311.
18. **Cheng Chi, Jun-Wei Lv, Dan Wang**, Calibration of triaxial magnetometer with ellipsoid fitting method, *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 2019, 237.
19. **Jiakun Li, Kuangi-shu, Heng Zhang**, An efficient method for tri-axis magnetometer calibration, *IEEE SmartWorld-UIC-ATC-SCALCOM-IOP-SCI*, 2019, pp. 654–660.

20. Pieniasek, J., Ellipsoid multi-axial sensor calibration with temperature compensation, *IEEE 5th International Workshop on Metrology for AeroSpace*, 2019, pp. 70–75.
 21. Merayo, J.M.G. and other, Scalar calibration of vector magnetometers, *Meas. Sci. Technol.*, 2000, 11, 120, pp. 120–132.
 22. Cheng, B., Zhou, B., Magnes, W. et al. High precision magnetometer for geomagnetic exploration onboard of the China Seismo-Electromagnetic Satellite, *Sci. China Technol.*, 61, 2018 pp. 659–668.
 23. Crassidis, J.L., Cheng, Y., Three-Axis Magnetometer Calibration Using Total Least Squares, *AIAA SciTech Forum*, 2020.
 24. Fedorov, V.V., *Theory of Optimal Experiments*, Academic Press, New York and London, 1972, 292 p.
 25. Дервянкин А.В. Алгоритмы калибровки блока МЭМС-акселерометров с использованием стенда-икосаэдра из конструктора «MOL» // XXIV Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам. СПб.: АО «Концерн «ЦНИИ «Электрон»», 2017. С. 294–298.
-

Egorov, Yu.G. (Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia), **Kiryachenko, G.Yu.** (Central Research Institute of Automation and Hydraulics (TsNIIAG), JSC, Moscow, Russia), and **Popov, E.A.** Study of Scalar Calibration Problems for a Vector Meter, *Giroskopiya i Navigatsiya*, 2022, vol. 30, no. 3 (118), pp. 20–30.

Abstract. The article continues studying the features of scalar calibration. The main objectives of this work are to generalize and analyze known calibration programs, compare the analytical metrics of estimates obtained from the programs generated using various target functions, assuming normal distribution of measurement errors. The article also draws conclusions about the feasibility of optimizing the calibration programs and about the general logic of their synthesis.

Key words: calibration, vector meter.

Материал поступил 11.07.2022