

**БЕСПЛАТФОРМЕННАЯ СИСТЕМА ОРИЕНТАЦИИ
ВРАЩАЮЩИХСЯ ПОДВИЖНЫХ ОБЪЕКТОВ
(ВЕКТОРНЫЙ СПОСОБ АВТОНОМНОЙ ОРИЕНТАЦИИ)**

Г.М. Проскуряков^{1*}, В.С. Полосухин²

¹Саратовский государственный технический университет
Россия, 410054, Саратов, Политехническая, 77
E-mail:wolverine-vlad@mail.ru

²ОАО «Институт критических технологий»
Россия, 410040, Саратов, пр. 50 лет Октября, 110А
*E-mail: kbkt@renet.ru

Аннотация. Для вращающихся подвижных объектов (вращающихся наземных и подземных, подводных и надводных, воздушных и комбинированных, баллистических и космических аппаратов) разработан **векторный способ** решения задачи автономной ориентации на основе обработки магнито-инерциальной информации, получаемой от трехосных блоков векторных датчиков (акселерометров, магнитометров, гироскопов). Приведены алгоритмы обработки комплексной информации для **векторного** способа, а также даны оценки условий их практической реализации в бесплатформенной геофизической системе ориентации.

Ключевые слова: вращающийся подвижный объект, бесплатформенная система ориентации, трехосные блоки акселерометров, магнитометров, гироскопов, алгоритм, матрица, векторы магнитного поля Земли, кажущегося ускорения и угловой скорости вращения объекта, гармонические функции.

**STRAPDOWN ATTITUDE CONTROL SYSTEM ROTATING
MOVING OBJECTS
(VECTOR METHOD OF AUTONOMOUS ORIENTATION)**

G. M. Proskuryakov, V. S. Polosukhin.

Annotation: For rotating moving objects (rotating surface and underground, underwater and overwater, air and combined, ballistic and space vehicles developed a vector method for solving the problem of autonomous orientation, based on processing magneto-inertial information, received from the three-axle unit of vector

sensors (accelerometers, magnetometers, gyroscopes). Algorithms for processing of complex information for the vector method, and are evaluating the conditions of their implementation in the strapdown geophysical system orientation.

Keywords: rotating a moving object strapdown orientation system, three-axle units of accelerometers, magnetometers, gyroscopes, algorithm, the matrix, the vectors of the magnetic field of the Earth, of the apparent acceleration and angular velocity of the rotation, harmonic functions.

Введение. Многим подвижным объектам (наземным и подземным, подводным и надводным, воздушным и комбинированным, баллистическим и космическим) для упрощения решения задач ориентации, стабилизации и управления в пространстве придается принудительное вращение вокруг продольной оси X с угловой скоростью ω_0 . Для построения на борту таких вращающихся подвижных объектов (ВПО) базовых отсчетных систем координат на практике находят применение гироскопические (ГСО), бесплатформенные инерциальные (БИСО) и бесплатформенные геофизические (БГСО) системы ориентации [1-10]. В последнее время предпочтение отдают БГСО, как более перспективным системам, обладающим меньшими массогабаритными параметрами, более высокими показателями точности и надежности, гибкости и самопроверяемости, живучести и отказоустойчивости. В работах [16-18] проведен сравнительный анализ схем построения современных БГСО, а также предложены более совершенные алгоритмы обработки комплексной информации, разработанные на основе хронометрического (АХ) и гармонического (АГ) способов автономной ориентации ВПО.

Обе группы алгоритмов АХ и АГ предполагают получение от трехосных блоков магнитометров (ТБМ), акселерометров (ТБА) и гироскопов (ТБГ) комплексной (магнитно-инерциальной) информации и обработки ее в микроконтроллере измерительно-вычислительной системы. В работах [16, 18]

дано обоснование формирования и работоспособности алгоритмов (АХ) и (АГ), а также приведены оценки их практической реализуемости.

Вместе с тем более глубокий анализ хронометрического и гармонического способов решения задачи автономной ориентации ВПО показывает, что этим способам присущи следующие недостатки:

1. Алгоритмы АХ и АГ предусматривают решение задачи ориентации ВПО в виде последовательности операций:

- сначала выполняется операция кренуказания (определения текущего угла крена γ хронометрическим или гармоническим способом),

- а затем с учетом найденного текущего угла крена γ выполняется операция определения углов ориентации траектории полета (Ψ, Θ).

Такая технологическая последовательность выполнения измерительно-вычислительных операций не способствует повышению показателей точности и быстродействия системы ориентации.

2. Реализация алгоритмов АХ и АГ предполагает обязательное выполнение операций, связанных с определением моментов достижения сигналами поперечных датчиков нулевых или экстремальных значений (амплитуд выходных сигналов). Эта операция вносит дополнительные погрешности в обработку информации и задержку по времени ее обработки.

3. Алгоритмы АХ и АГ, построенные на основе использования хронометрического и гармонического способов автономной ориентации ВПО, не обладают в должной степени свойством функциональной избыточности информации.

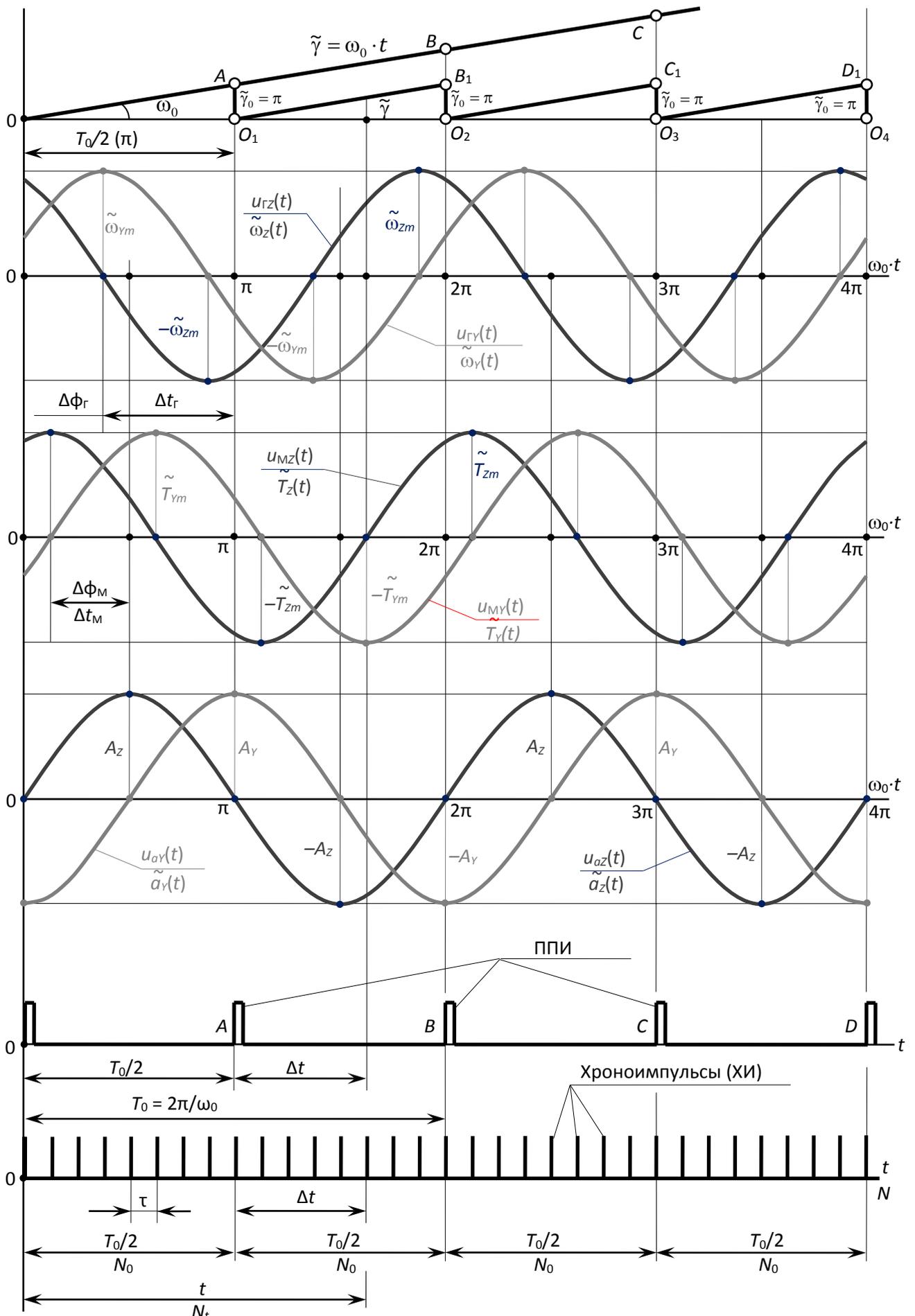


Рисунок 1. Выходные и управляющие сигналы БГСО в режиме автономной работы

От указанных недостатков, присущих хронометрическим и гармоническим способам решения задачи ориентации ВПО, свободен **векторный способ**, основанный на преобразовании уравнений связей между базовыми векторами, заданными в различных системах координат.

Показания блоков ТБМ, ТБА, ТБГ могут быть описаны с помощью уравнений Пуассона, кинематических уравнений Эйлера и геометрических уравнений преобразований координат, которые можно привести к векторно-матричной форме [10, 16]:

$$\mathbf{T}_m = [T_x \quad T_y \quad T_z]^T = B_m \cdot M \cdot [(S + E) \cdot A \cdot \mathbf{T}_{МПЗ} + \mathbf{T}_{МПО}^{\Pi}], \quad (1)$$

$$\boldsymbol{\omega}_m = [\omega_x \quad \omega_y \quad \omega_z]^T = B_r \cdot M \cdot [A \cdot \boldsymbol{\omega}_s + \boldsymbol{\omega}_0], \quad (2)$$

$$\mathbf{a}_m = [a_x \quad a_y \quad a_z]^T = B_a \cdot M \cdot [A \cdot \mathbf{a}_s + \boldsymbol{\omega}_0^2 \cdot \mathbf{r}_a], \quad (3)$$

Причем матрица ориентации ВПО A равна произведению матриц [16]:

$$A = A_\gamma \cdot A_\vartheta \cdot A_\psi = [a_{ij}]_3^3 \quad (4)$$

Обозначения, использованные в уравнениях (1) - (4), и их физический смысл раскрыты в источнике [16]. С учетом предварительно проводимых калибровок векторных датчиков и алгоритмической идентификации внешних факторов показания блоков $(\mathbf{T}_m, \boldsymbol{\omega}_m, \mathbf{a}_m)$, зафиксированные в связанном трехграннике $m=XYZ$, приведем к немагнитному ортонормированному \mathbf{a}_m основанию с резалевой системой координат:

$$\begin{aligned} \tilde{\mathbf{T}}_m &= (S + E)^{-1} \cdot [M^{-1} \cdot B_m^{-1} \cdot \mathbf{T} - \mathbf{T}_{МПО}^{\Pi}], \\ \tilde{\boldsymbol{\omega}}_m &= M^{-1} \cdot B_m^{-1} \cdot (\boldsymbol{\omega}_m - \boldsymbol{\omega}_0), \\ \tilde{\mathbf{a}}_m &= M^{-1} \cdot B_a^{-1} \cdot (\mathbf{a}_m - \boldsymbol{\omega}_0^2 \cdot \mathbf{r}_a), \end{aligned} \quad (5)$$

Векторы $\mathbf{T}_{МПЗ}, \mathbf{a}_s, \boldsymbol{\omega}_s$ заданы в неподвижном трехграннике $s = NHE$:

$$\begin{aligned} \mathbf{T}_{МПЗ} &= [T_N \quad T_H \quad T_E]^T, \\ \mathbf{a}_s &= [a_N \quad a_H \quad a_E]^T = \mathbf{a}_{cs} + \mathbf{a}_{es} - \mathbf{g}_s, \\ \boldsymbol{\omega}_s &= [\omega_N \quad \omega_H \quad \omega_E]^T = A_\psi^{-1} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ \dot{\psi} \\ \dot{\vartheta} \end{bmatrix} + \Omega \cdot \begin{bmatrix} \cos \varphi \\ \sin \varphi \\ 0 \end{bmatrix}, \end{aligned} \quad (6)$$

где \mathbf{a}_{es} — вектор переносного ускорения ВПО, обусловленного траекторным движением объекта,

\mathbf{a}_{cs} — вектор ускорения Кориолиса, отнесенный к географическому трехграннику $S = NHE$,

\mathbf{g}_s — вектор напряженности поля тяжести Земли, заданный в географическом трехграннике S ,

A_ψ^{-1} — матрица, обратная матрице курса A_ψ ,

φ — географическая широта точки текущего местоположения ВПО,

$\dot{\psi}, \dot{\vartheta}$ — угловые скорости искривления траектории ВПО в горизонтальной и вертикальной плоскостях,

Ω — угловая скорость вращения Земли вокруг оси Мира, $\Omega=15,0402$ град/час.

$T_N; T_H; T_E$ — проекции векторов $\bar{T}_{МПЗ}, \bar{a}_S, \bar{\omega}_S$ на оси географического

$a_N; a_H; a_E$ трехгранника (N - географический север, H - вертикаль, E -

$\omega_N; \omega_H; \omega_E$ направление на восток).

Причем,

$$\mathbf{a}_{es} = \begin{bmatrix} (\dot{\vartheta} \cos \vartheta - v \cdot \dot{\vartheta} \sin \vartheta) \cdot \cos \psi + \dot{\psi} \cdot v \cdot \sin \psi - g_N \\ \dot{\vartheta} \sin \vartheta + v \cdot \dot{\vartheta} \cos \vartheta - g_H \\ (\dot{\vartheta} \cos \vartheta - v \cdot \dot{\vartheta} \sin \vartheta) \cdot \sin \psi - v \cdot \dot{\psi} \cdot \cos \psi \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$\mathbf{a}_{cs} = 2 \cdot \Omega \cdot v \cdot \begin{bmatrix} \cos \vartheta \cdot \sin \psi \cdot \sin \varphi \\ -\cos \vartheta \cdot \sin \psi \cdot \sin \varphi \\ \sin \vartheta \cdot \cos \varphi - \cos \vartheta \cdot \cos \psi \cdot \sin \varphi \end{bmatrix} \quad (8)$$

где v - скорость полета ВПО.

Проекции T_N, T_H, T_E, g_N, g_H могут быть вычислены для нормального геомагнитного поля (МПЗ-Н) и поля тяжести Земли (ПТЗ-Н) по математическим моделям IGRF (например, WMM-2015, сайт в сети INTERNET <http://www.ngdc.noaa.gov>) и ПЗ-90 или WGS -84 [13]:

$$\begin{aligned} T_N^H &= \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{R}{r} \right)^{n+2} \sum_{m=0}^n [g_n^m \cdot \cos m\lambda + h_n^m \cdot \sin m\lambda] \cdot \frac{dP_n^m(\sin \varphi)}{d\varphi} \\ T_H^H &= \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{R}{r} \right)^{n+2} \sum_{m=0}^n [g_n^m \cdot \sin m\lambda - h_n^m \cdot \cos m\lambda] \cdot P_n^m(\sin \varphi) \\ T_E^H &= -\sum_{n=1}^{\infty} (n+1) \left(\frac{R}{r} \right)^{n+2} \sum_{m=0}^n [g_n^m \cdot \cos m\lambda + h_n^m \cdot \sin m\lambda] \cdot \frac{P_n^m(\sin \varphi)}{\cos \varphi} \\ g_N &= \Omega^2 \sin \varphi \left[H + R \cos \varphi \left(1 - \left(\frac{R}{r} \right)^2 \right) \right] \end{aligned} \quad (9)$$

$$g_H = \left(\frac{R}{r}\right)^2 \cdot g - \Omega^2 \cos \varphi \left[H + R \left(1 - \left(\frac{R}{r}\right)^2 \right) \right] \quad (10)$$

$$g_E \approx 0,$$

где R — средний радиус Земли, $R = 6378,111$ км,

r — радиус точки местоположения блоков ТБМ и ТБА, относительно центра Земли, $r = R + H$,

φ, λ — сферические координаты точки (географическая широта и долгота),

H — высота (глубина) расположения точки,

$P_n^m(\sin \varphi)$ — присоединенные функции Лежандра n -ой степени порядка m ,

g_n^m, h_n^m — коэффициенты гармонического сферического ряда разложения (коэффициенты Гаусса-Шмидта),

g — нормированная сила тяжести в точке местоположения ТБА.

На поверхности земного трехосного эллипсоида

$$g = 9,78045 \cdot \left[1 + 0,0053033 \sin^2 \varphi - 0,0000059 \sin^2 2\varphi + 0,0000167 \cdot \cos^2 \varphi \cdot \cos 2(\lambda - 15^\circ) \right], \quad (11)$$

на поверхности сфероида

$$g = 9,78045 \cdot \left[1 + 0,0053033 \sin^2 \varphi - 0,0000059 \sin^2 2\varphi \right], \quad (12)$$

а на поверхности земной сферы

$$g = 9,78045 \cdot \left[1 + 0,0053033 \sin^2 \varphi \right]. \quad (13)$$

Параметры МПЗ-Н и ПТЗ-Н подлежат периодической паспортизации, они уточняются на каждый пятилетний период (эпоху), а иногда и чаще.

С учетом приведения показаний блоков в соответствии с выражениями (4) уравнения (1)-(3) можно привести к системе укороченных уравнений:

$$\left. \begin{aligned} \tilde{\mathbf{T}} &= A \cdot \mathbf{T}_{\text{МПЗ}} \\ \tilde{\boldsymbol{\omega}} &= A \cdot \boldsymbol{\omega}_s \\ \tilde{\mathbf{a}} &= A \cdot \mathbf{a}_s \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

С учетом упрощения (для чисел Маха $M \leq 2 \bar{a}_{cs} \approx 0$) выражения (6)-(8) можно привести к укороченным формам. При этом производные по времени t могут быть вычислены на каждом дискретном интервале Δt по формулам:

$$\dot{v} \approx \frac{\Delta v}{\Delta t},$$

$$\begin{aligned}\dot{\psi} &\approx \frac{\Delta\psi}{\Delta t} = \frac{\Delta \sin \psi}{\Delta t \cdot \cos \psi} = -\frac{\Delta \cos \psi}{\Delta t \cdot \sin \psi} \\ \dot{\vartheta} &\approx \frac{\Delta\vartheta}{\Delta t} = \frac{\Delta \sin \vartheta}{\Delta t \cdot \cos \vartheta} = -\frac{\Delta \cos \vartheta}{\Delta t \cdot \sin \vartheta}\end{aligned}\quad (15)$$

Если полет ВПО происходит в режиме стабилизации по баллистической траектории, формируемой в соответствии с принципами терминального управления (с учетом задания начальных условий пуска объекта ψ_0, ϑ_0, v_0), то скорость полета ПО v и угол тангажа ϑ в любой точке траектории по истечении времени t после старта могут быть вычислены по формулам:

$$\begin{aligned}v &= \left[v_0^2 - 2v_0gt \sin \vartheta_0 + (gt)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \\ \sin \vartheta &= \frac{v_0 \sin \vartheta_0 - gt}{v}; \quad \cos \vartheta = \frac{v_0 \sin \vartheta_0}{v}\end{aligned}\quad (16)$$

Если же рассматривается режим управления ВПО, то предполагается, что его скорость v измеряется датчиком скорости, а угол тангажа ϑ определяется с помощью БГСО.

Векторный способ решения задачи ориентации ВПО основан на преобразовании системы векторно-матричных уравнений (14). Принимая во внимание матричные соотношения (4) для матрицы ориентации A , исходную систему уравнений (14) можно решить в общем (аналитическом) виде относительно неизвестных направляющих косинусов $a_{ij}(i, j = \overline{1,3})$:

$$\begin{aligned}\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \end{bmatrix}^T &= N^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \tilde{T}_x & \tilde{a}_x & \tilde{\omega}_x \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} a_{21} & a_{22} & a_{23} \end{bmatrix}^T &= N^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \tilde{T}_y & \tilde{a}_y & \tilde{\omega}_y \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix}^T &= N^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \tilde{T}_z & \tilde{a}_z & \tilde{\omega}_z \end{bmatrix}\end{aligned}\quad (17)$$

где N - квадратная матрица преобразования векторов (3×3).

Причем

$$N = \begin{bmatrix} T_N & T_H & T_E \\ a_N & a_H & a_E \\ \omega_N & \omega_H & \omega_E \end{bmatrix}\quad (18)$$

Для получения обратной матрицы N^{-1} матрица N должна быть невырожденной и хорошо обусловленной [10]:

$$\det N \neq 0, \quad (19)$$

$$\text{cond } N \neq \|N\| \cdot \|N^{-1}\| \rightarrow \min \quad (20)$$

Векторный способ решения задачи ориентации ВПО (так же как и хронометрический и гармонический способы) создает условия для получения функциональной избыточности информации. Эти условия, с одной стороны, позволяют повысить показатели точности и надежности миниатюрной бесплатформенной системы ориентации, реализующей алгоритмы хронометрического (АХ), гармонического (АГ) и векторного (АВ) способов автономной ориентации ВПО, а с другой стороны, позволяют реализовать условия для организации системы встроенного самоконтроля правильности выполнения вычислительного процесса по условиям коллинеарности ортов ($\mathbf{i}_j \parallel \mathbf{i}_t; j = t$):

$$\mathbf{i}_j \cdot \mathbf{i}_t = \sum_{m=1}^3 a_{jm}^2 = 1 \quad \left(\begin{array}{l} t, j = \overline{1,3} \\ j = t \end{array} \right), \quad (21)$$

Это по условию ортогональности ортов $\mathbf{i}_j \perp \mathbf{i}_t (j \neq t)$:

$$\mathbf{i}_j \cdot \mathbf{i}_t = \sum_{m=1}^3 a_{jm} \cdot a_{tm} = 0 \quad \left(\begin{array}{l} t, j = \overline{1,3} \\ j \neq t \end{array} \right), \quad (22)$$

Это по условию связанности направляющих косинусов a_{ij} с их минорами $A_{ji} (i, j = \overline{1,3})$:

$$a_{ij} = A_{ji} \quad (i, j = \overline{1,3}) \quad (23)$$

На основе вычисленных по формулам (17)-(23) направляющих косинусов $a_{ij} (i, j = \overline{1,3})$ возможно определение текущих значений углов пространственной ориентации ВПО (ψ, ϑ, γ) без предварительного вычисления угла вращения (крена) γ объекта [14], [15], [16]:

$$\begin{aligned} \cos \vartheta_1 &= (a_{11}^2 + a_{13}^2)^{\frac{1}{2}} \\ \cos \vartheta_2 &= (a_{22}^2 + a_{32}^2)^{\frac{1}{2}} \\ \sin \vartheta_3 &= a_{12} \end{aligned} \quad \left(\begin{array}{l} \text{канал} \\ \text{тангажа} \end{array} \right) \quad (24)$$

$$\begin{aligned} \sin \psi_1 &= \frac{a_{13}}{\cos \vartheta_1} = \frac{a_{13}}{\cos \vartheta_2} \\ \cos \psi_2 &= \frac{a_{11}}{\cos \vartheta_1} = \frac{a_{11}}{\cos \vartheta_2} \end{aligned} \quad \left(\begin{array}{l} \text{канал} \\ \text{курса} \end{array} \right) \quad (25)$$

$$\begin{aligned} \sin \gamma_1 &= -\frac{a_{32}}{\cos \vartheta_1} = -\frac{a_{32}}{\cos \vartheta_2} \\ \cos \gamma_2 &= \frac{a_{22}}{\cos \vartheta_1} = \frac{a_{22}}{\cos \vartheta_2} \end{aligned} \quad \left(\begin{array}{l} \text{канал} \\ \text{крена} \end{array} \right) \quad (27)$$

Анализ алгоритмов решения задач автономной ориентации ВПО на основе использования хронометрического, гармонического и векторного способов показывает, что эти алгоритмы (АХ, АГ, АВ) являются многомерными и нелинейными. Все три способа ориентации ВПО базируются на общем подходе к разработке алгоритмов решения задачи автономной ориентации, заключающемся в формировании исходной информации о векторах напряженности МПЗ ($T_{МПЗ}$), кажущегося ускорения (a) и абсолютной угловой скорости вращения объекта (ω), компоненты которых определены как в географическом трехграннике $s = NHE$ (T_s, a_s, ω_s) так и в приборном связанном трехграннике $m = XYZ$ (измерения векторов T_m, a_m, ω_m) с последующим сопоставлением приборной информации ($T_m, a_m, \omega_m; \tilde{T}_m, \tilde{a}_m, \tilde{\omega}_m$) с геофизической информацией о тех же векторах, заданных в географическом трехграннике s (рис.1).

Таблица 1. Способы и алгоритмы автономной ориентации.

N п/п	Способ решения задачи автономной ориентации ВПО	Алгоритм		Сущность способа решения задачи ориентации ВПО	Особенности
		Обозначения	Формулы		
1	Хронометрический	АХ	В источнике [16]: (15)-(17) (21)-(26)	Используется хронометрический эффект вращения ВПО и принцип хронометрирования процесса непрерывного вращения ВПО с последующим алгоритмическим вычислением углов ориентации объекта	Сам ВПО рассматривается как хранитель времени t и частоты (ν, ω) в пределах каждого полуоборота объекта.
2	Гармонический	АГ	В источнике [18]: (5) -(14) (19), (20) (27) - (34)	Используется модулирующий эффект вращения ВПО, принцип гармонической модуляции сигналов векторных датчиков и алгоритмического вычисления параметров ориентации объекта	Гармонические колебания сигналов ТБА используются как опорные для оценки параметров гармонических колебаний сигналов ТБМ и ТБГ.
3	Векторный	АВ	В настоящей статье: (5) - (26)	Реализуется принцип векторного согласования отсчетных систем координат, принцип аналитического пространственного ориентирования ВПО с вычислением матрицы, углов и других параметров ориентации объекта, Может быть реализован принцип АГК в различных вариантах.	Может быть разработан широкий ряд двухвекторных и трехвекторных алгоритмов ориентации подвижного основания.

Общая характеристика алгоритмов АГ, АХ, АВ представлена в табл.1. [16,18]. Анализ табл.1 и рис.1 показывает, что все алгоритмы автономной

ориентации ВПО, разработанные на основе хронометрического (АХ), гармонического (АГ) и векторного (АВ) способов, используют в принципе одну и ту же исходную информацию о векторах ($\mathbf{T}_m, \mathbf{a}_m, \boldsymbol{\omega}_m; \mathbf{T}_S, \mathbf{a}_S, \boldsymbol{\omega}_S$), но предполагают разные схемы обработки этой информации.

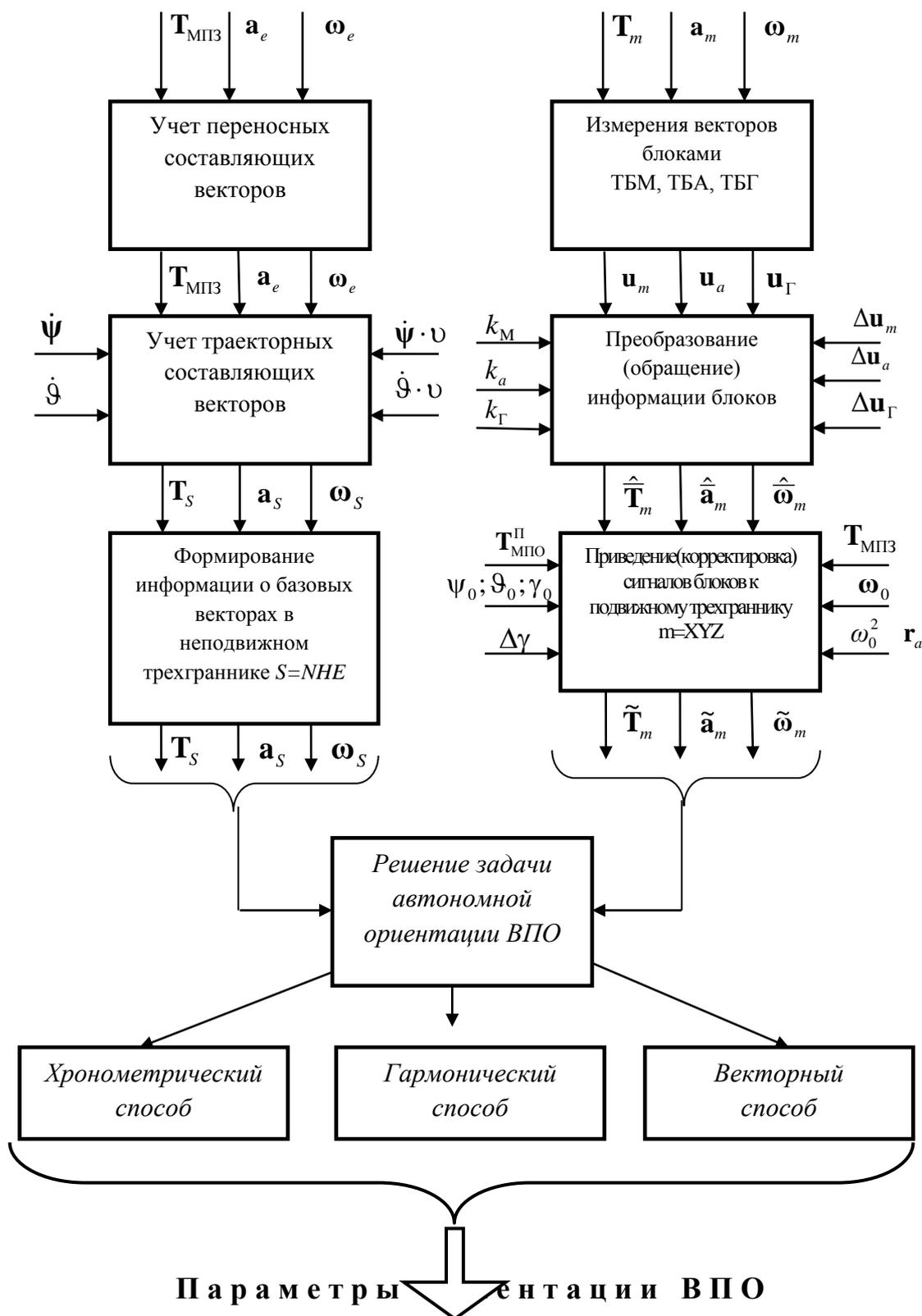


Рисунок 2. Схема формирования алгоритмов автономной ориентации ВПО(АХ,АГ,АВ).

Список литературы.

1. Смирнов В. А. Система стабилизации и наведения линии визирования с уменьшенными габаритами и особенности ее динамики // XV Юбилейная С.-Петербур. международ. конф. по интегрированным навигационным системам, 26–28 мая 2008 г. СПб.: ГНЦ РФ ЦНИИ «Электроприбор». 2008. С. 166–168.

2. Белобрагин В. Н., Зайцев В. Д., Распопов В. Я., Горин В. И., Горин А. А., Дмитриев В. А., Сорокин В. И., Ермилов С. П. Опыт разработки гироприборов для вращающихся по крену изделий // XII С.-Петербур. международ. конф. по интегрированным навигационным системам. 23–25 мая 2005 г. СПб. : ГНЦ РФ ЦНИИ «Электроприбор». 2005. С. 183–194.

3. Царев И. В., Шило В. В., Бортовик В. Б., Дминтриев В. А., Ермилов С. П., Распопов В. Я., Малютин Д. М., Иванов Ю. В., Алалуев Р. В. Разработка магнитометрического измерителя текущего положения // XII С.-Петербур. международ. конф. по интегрированным навигационным системам. 23–25 мая 2005 г. СПб. : ГНЦ РФ ЦНИИ «Электроприбор». 2005. С. 215–217.

4. Распопов В. Я., Малютин Д. М., Иванов Ю. В., Алалуев Р. В. Малогабаритная система ориентации // Датчики и системы. 2004, № 8. С. 2–5.

5. Пат. RU 2256881 С2 Российская Федерация, МПК G01C 21/16. Способ определения параметров ориентации и навигации и бесплатформенная инерциальная навигационная система для быстровращающихся объектов / заявители Ачильдиев В.М., Мезенцев А. П., Решетников В. И., Сысоев И. В., Трешкин А. И. ; патентообладатель ФГУП «Научно-исследовательский институт прикладной механики имени академика В.И. Кузнецова». – № 2003107688/28 ; заявл. 21.03.2003 ; опубл. 20.07.2005 , Бюл. 20. – 11 с.

6. Погорелов М. Г., Шведов А. П., Малютин Д. М. Система ориентации подвижного объекта по показаниям магнитных датчиков // Датчики и системы. 2004, № 5. С. 51–54.

7. Пат. RU 2130588 С1 Российская Федерация, МПК G01C 21/08, G01C 21/12, G01C 17/38. Способ измерения магнитного курса подвижного объекта / заявители Архипов В. А., Ветошкина Н. К., Зузлов В. Ф., Лебедев С. О., Потапов А. А., Олаев В. А.; патентообладатель ОАО «Чебоксарский приборостроительный завод "Элара"» – № 98108097/28 ; заявл. 23.04.1998 ; опубл. 20.05.1999, Бюл. 16, – 12 с.

8. Пат. RU 2527369 С1 Российская Федерация, МПК F42В 15/01, G01C 21/08. Способ определения угла крена вращающегося по крену летательного аппарата / заявители Шипунов А. Г., Бабичев В. И., Морозов В. И., Шигин А. В., Рабинович В. И., Долгова Т. С., Акулинин С. И., Монькин В. Б., Бальзамов И. А.; патентообладатель ОАО «Конструкторское бюро приборостроения имени ак. А. Г. Шипунова». – №2013115672/11; заявл. 09.04.2013 ; опубл. 27.08.2014, Бюл. № 24. – 17 с.

9. Кринецкий Е. И. Системы самонаведения. М. : Машиностроение, 1970. 236 с.
10. Игнатъев А. А., Проскуряков Г. М., Васильев А. В. Алгоритмы работы миниатюрной системы ориентации вращающихся подвижных объектов // Гетеромагнитная микроэлектроника: сб. науч. тр. Саратов: Изд-во Сарат. госуд. ун-та/ 2014. Вып. 17 : Гетеромагнитная микро- и наноэлектроника. Методические аспекты физического образования. Экономика в промышленности. С. 78–91.
11. Матвеев В. В., Распопов В. Я. Основы построения бесплатформенных инерциальных навигационных систем. СПб.: ГНЦ РФ ОАО «Концерн ЦНИИ "Электроприбор"», 2009. 280 с.
12. Розенцвейн В. Г. Современное состояние скважинных гироскопических навигационных систем // Применение гравиинерциальных технологий в геофизике : сб. ст. и докл. СПб. : ГНЦ РФ ЦНИИ «Электроприбор». 2002. С. 146–167.
13. Захарин М. И., Захарин Ф. М. Кинематика инерциальных систем навигации. М. : Машиностроение, 1968. 235 с.
14. Игнатъев А. А., Проскуряков Г. М., Маслов А. А. Миниатюрная курсоверткаль для квазистационарных объектов // Гетеромагнитная микроэлектроника: сб. науч. тр. Саратов: Изд-во Сарат. ун-та, 2014. Вып. 16: Гетеромагнитная микро- и наноэлектроника. Методические аспекты физического образования. Экономика в промышленности. С. 64–74.
15. Анучин О. Н., Емельянец Г. И. Интегрированные системы ориентации и навигации для морских подвижных объектов. СПб.: ГНЦ РФ ЦНИИ «Электроприбор», 1999. 357 с.
16. Игнатъев А.А., Проскуряков Г.М., Васильев А.В., Маслов А.А. Бесплатформенная система ориентации вращающихся подвижных объектов (хронометрический способ автономной ориентации) // Гетеромагнитная микроэлектроника: сб. науч. тр. Саратов: Изд-во Сарат. Ун-та, 2015. Вып 18: Гетеромагнитная микро- и наноэлектроника.
17. Игнатъев А.А., Проскуряков Г.М. Гетеромагнитометрия: алгоритмы, методики, калибровки блоков и магнитометров. Саратов: Изд-во Сарат. госуд. ун-та, 2014. 152 с.
18. Проскуряков Г.М., Игнатъев А.А., Маслов А.А. Бесплатформенная система ориентации вращающихся подвижных объектов (гармонический способ автономной ориентации) // Гетеромагнитная микроэлектроника: сб. науч. тр. Саратов: Изд-во Сарат. Ун-та, 2015. Вып 18: Гетеромагнитная микро- и наноэлектроника. С. 66