
ГИРОСКОПИЧЕСКИЕ И НАВИГАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ

УДК 656.2

Г. И. ЕМЕЛЬЯНЦЕВ, А. В. ЛОЧЕХИН

ПОГРЕШНОСТИ БЕСКАРДАННОГО ГИРОГОРИЗОНТКОМПАСА НА ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОМ ГИРОСКОПЕ И МИКРОМЕХАНИЧЕСКИХ ДАТЧИКАХ

Предложена схема построения бескарданного гироскопического компаса на электростатическом гироскопе и микромеханических датчиках для применения в системах навигации подводных аппаратов, приведены алгоритмы работы. Рассмотрены характер и уровень погрешностей бескарданного гироскопического компаса при навигационном режиме работы в выработке параметров ориентации с применением данных от гидроакустического лага и глубиномера. Особенностью предложенной схемы является использование информации, полученной от электростатического гироскопа, для уточнения параметров ориентации, вырабатываемых инерциальным измерительным модулем, построенным на микромеханических гироскопах и акселерометрах. Алгоритмы строятся на базе обобщенного фильтра Калмана с обратной связью по всему вектору состояния.

Ключевые слова: гироскопический компас, электростатический гироскоп, микромеханические инерциальные датчики, гидроакустический лаг.

Введение. Обеспечение требований по точности выработки курса — одна из проблем, возникающих при создании малогабаритного бескарданного гироскопического компаса (БГК) для морских подвижных объектов, содержащего инерциальный измерительный модуль низкого уровня точности (например, блок, построенный на микромеханических акселерометрах и гироскопах, уровень точности которых составляет соответственно $0,01 \text{ м/с}^2$ и $0,01 \text{ град/с}$). Один из способов решения этой проблемы [1] — использование для подвижных объектов приемной аппаратуры спутниковых навигационных систем с разнесенными антеннами для осуществления фазовых измерений. Однако в системах навигации необитаемых подводных аппаратов (НПА) описанный способ можно использовать только в надводном положении при режиме начальной выставки и калибровки системы [2]. Для ограничения погрешности измерительного модуля на микромеханических датчиках (ММД) по курсу в условиях эксплуатации НПА предлагается использовать информацию, поступающую от бескарданного электростатического гироскопа (БЭСГ) [3], установленного в одном корпусе с инерциальным измерительным модулем [2].

На рис. 1 приведена структурная схема навигационной системы счисления пути подводного аппарата (ГАЛ — гидроакустический лаг, ГАНС — гидроакустическая навигационная система, ПА СНС — приемная аппаратура спутниковой навигационной системы, ММГ и ММА — микромеханические гироскопы и акселерометры БГК, НП и ДП — навигационные и динамические параметры; φ, λ, h — географические координаты; V_E, V_N, V_H — составляю-

щие линейной скорости объекта; K — курс; $V_E^{ГАЛ}, V_N^{ГАЛ}$ — составляющие линейной скорости, получаемые от ГАЛ; $\varphi^{ГАНС}, \lambda^{ГАНС}$ — географические координаты, вырабатываемые ГАНС; $h_{гг}$ — данные о высоте, поступающие от глубиномера). Для коррекции погрешностей БЭСГ с полярной ориентацией из-за его прецессии при работе БГГК в навигационном режиме периодически привлекается информация о координатах объекта от ГАНС.

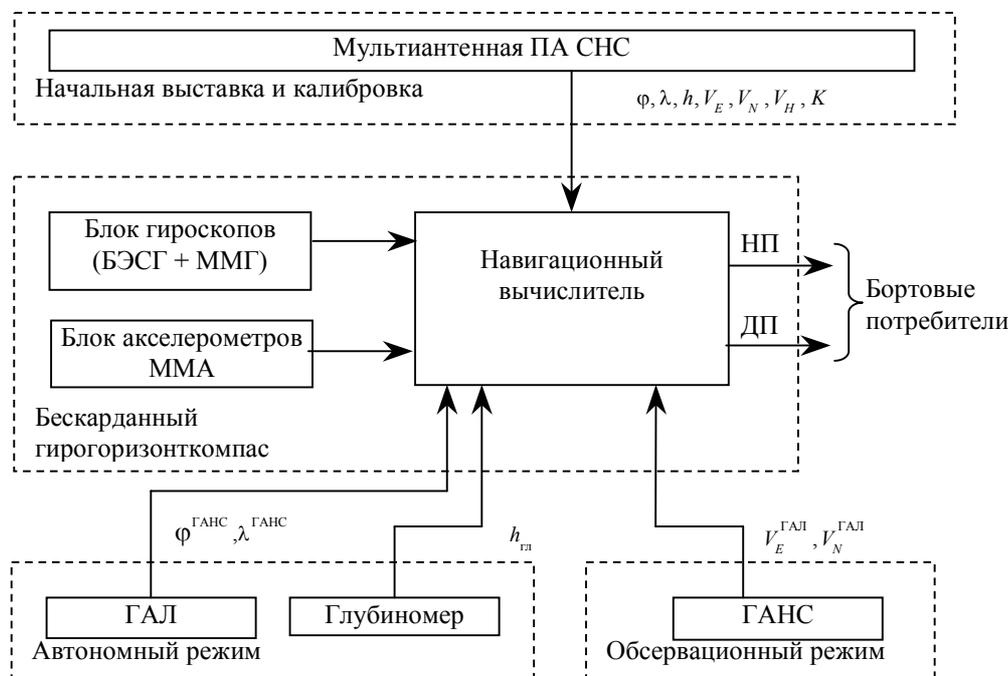


Рис. 1

К достоинствам такой схемы построения БГГК следует отнести малые значения массогабаритных характеристик и возможность функционирования в высоких широтах (в этом случае начальная ориентация вектора кинетического момента БЭСГ задается в плоскости земного экватора). Точность выработки параметров ориентации объекта предполагается на уровне лучших образцов зарубежных БГГК на волоконно-оптических гироскопах.

Для предложенного БГГК существуют два режима работы: первый — начальная выставка и калибровка системы при надводном положении; второй — навигационный, используется при подводном положении аппарата и предназначен для выработки параметров ориентации (курса и углов качки). Для выработки навигационных параметров (составляющих вектора линейной скорости и координат места) используется информация, поступающая от ГАЛ, ГАНС и глубиномера. Исследованию навигационного режима работы БГГК и посвящена предложенная статья.

Постановка задачи. Рассмотрим навигационный режим работы БГГК и проанализируем алгоритмы выработки параметров ориентации объекта и уровень погрешностей БГГК.

Определим следующие системы координат (СК): $Окн_1кн_2кн_3$ — система координат, связанная с корпусом БЭСГ ($кн$ — корпусные номинальные оси); $Оо_1о_2о_3$ — система координат, связанная с НПА, начало которой расположено в его центре масс ($о$ — объект); $Ог_1г_2г_3$ — сопровождающий географический навигационный трехгранник; $и_1и_2и_3$ — инерциальная СК с началом в центре масс Земли; $к_1к_2к_3$ — квазиинерциальная СК, совпадающая в момент коррекции положения БЭСГ с осями ортогонального гироскопического

трехгранника $q_1q_2q_3$, построенного на ортах кинетических моментов виртуального и реального БЭСГ.

Решение задачи ориентации НПА, реализуемой в программном обеспечении измерительного модуля, построенного на ММД, сводится к нахождению искомого кватерниона, определяющего ориентацию объекта относительно географических осей [4]. Текущие значения матрицы направляющих косинусов C_r^o и углов курса K , дифферента ψ и крена θ вычисляются по полученным значениям элементов кватерниона.

Координаты местоположения подводного аппарата вычисляются методом счисления пути по информации, полученной от ГАЛ, о составляющих вектора линейной скорости и значениям K, ψ, θ , поступающим из задачи ориентации.

Известно, например [5], что при использовании ММД в составе измерительного модуля можно обеспечить выработку углов качки с приемлемой точностью, привлекая для демпфирования шулеровских колебаний информацию о скорости от ПА СНС или лага. Однако в таком модуле погрешность по курсу постоянно растет во времени. Использование БЭСГ обеспечивает непрерывную коррекцию погрешности по курсу в условиях эксплуатации НПА.

Особенности предлагаемого навигационного режима БГГК заключаются в следующем:

— используется информация калибруемого БЭСГ, а также так называемого „опорного“ БЭСГ, формируемая по данным, поступающим от мультиантенной ПА СНС и блока ММД („виртуальный“ БЭСГ считается идеальным, не имеющим дрейфа). На основании проекций векторов их кинетических моментов моделируется ортогональный гироскопический трехгранник $q_1q_2q_3$;

— применяется дискретный алгоритм обработки, основанный на представлении уравнений погрешностей системы в так называемой квазиинерциальной СК, оси которой дискретно согласуются с осями трехгранника $q_1q_2q_3$, что позволяет осуществлять линеаризацию указанных уравнений;

— для описания дрейфа БЭСГ используется упрощенная модель суммарного дрейфа, представленного, например, в виде винеровского процесса;

— для обработки измерений используется алгоритм обобщенного фильтра Калмана с обратной связью по всему вектору состояния системы.

Формирование измерений. При решении задачи используются пять скалярных измерений, первые два из которых имеют вид

$$z_1 = \cos \theta^p - \cos \theta, \quad z_2 = h_{ки}^p - h_{ки}^э, \quad (1)$$

где z_1 представляет собой разность косинусов расчетного θ^p и измеренного θ углов между ортами векторов кинетических моментов „виртуального“ и реального БЭСГ; z_2 — первый элемент вектора

$$\mathbf{Z}_2 = \mathbf{h}_{ки}^p - \mathbf{h}_{ки}^э,$$

$\mathbf{h}_{ки}^p, \mathbf{h}_{ки}^э$ — расчетные (прогнозируемые) и эталонные значения орта реального БЭСГ в проекциях на оси квазиинерциальной СК.

Алгоритмы прогнозирования ухода $\mathbf{h}_{ки}^p$ БЭСГ (расчетные значения орта кинетического момента гироскопа) в инерциальной СК приведены в работах [2, 6].

Эталонные значения орта $\mathbf{h}_{ки}^э$ формируются следующим образом:

$$\mathbf{h}_{ки}^э = \mathbf{C}_{ки}^и \mathbf{C}_и^o \mathbf{C}_о^{кн} \mathbf{h}_{кн},$$

где $\mathbf{C}_{ки}^и$ — матрица, определяющая положение квазиинерциальной СК относительно инерци-

альной, равна значению матрицы $(C_{\text{и}}^q)^T$ в моменты коррекции положения БЭСГ; $C_{\text{о}}^{\text{кн}}$ — матрица ориентации измерительных осей БЭСГ относительно осей, связанных с НПА, определяется при калибровке БЭСГ в условиях стенда; $C_{\text{и}}^{\text{о}}$ — матрица ориентации НПА относительно инерциальной СК, вычисляется по информации, поступающей от инерциального измерительного модуля на ММД о курсе и углах качки, а также значениям координат места от навигационной системы счисления пути.

Полагая, что погрешности измерительного модуля на ММД по параметрам ориентации, погрешности счисления координат места, а также уходы БЭСГ малы, линеаризованные измерения (1) можно представить в следующем виде:

$$\begin{aligned} z_1 &= -\sin \theta (c_{11}c_{r32} - c_{21}c_{r31})\alpha - \sin \theta (c_{21}c_{r33} - c_{31}c_{r32})\beta - \sin \theta (-c_{11}c_{r33} + c_{31}c_{r31})\gamma + w_1, \\ z_2 &= (h_{r1}c_{r12} - h_{r2}c_{r11})\alpha + (h_{r2}c_{r13} - h_{r3}c_{r12})\beta + (-h_{r1}c_{r13} + h_{r3}c_{r11})\gamma + w_2, \end{aligned} \quad (2)$$

где α, β, γ — погрешности измерительного модуля на ММД в решении задачи ориентации (α — по курсу, β, γ — в моделировании вертикали места); c_{nm}, c_{rnm} ($n, m = 1, 2, 3$) — элементы матриц $C_{\text{Г}}^{\text{и}}, C_{\text{ки}}^{\text{Г}}$ соответственно; h_l ($l = r1, r2, r3$) — проекции вектора $\mathbf{h}_{\text{кн}}$ на географические оси; w_1, w_2 — шумы измерений, включающие погрешности списывающих устройств БЭСГ, его уходы в инерциальной СК и погрешности вычисления навигационной системой счисления пути координат места.

Значения z_1 и z_2 дополняют известные [4] скоростные измерения, формируемые с использованием данных, поступающих от ГАЛ, а также измерения глубиномера:

$$\left. \begin{aligned} z_3 &= V_{r1}^{\text{БГГК}} - V_{r1}^{\text{ГАЛ}} = \Delta V_{r1} - V_{r2}\alpha + V_{\text{тг1}} + w_3, \\ z_4 &= V_{r2}^{\text{БГГК}} - V_{r2}^{\text{ГАЛ}} = \Delta V_{r2} - V_{r1}\alpha + V_{\text{тг2}} + w_4, \\ z_5 &= h^{\text{БГГК}} - h_{\text{гп}} = \Delta h + w_5, \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

где $\Delta V_{r1}, \Delta V_{r2}, \Delta h$ — погрешности БГГК по восточной и северной составляющим вектора линейной скорости и глубине погружения; $w_3 = -\delta V_{o1} \cos K - \delta V_{o2} \sin K$, $w_4 = \delta V_{o1} \sin K - \delta V_{o2} \cos K$ — шумы измерений, включающие $\delta V_{o1}, \delta V_{o2}$ — инструментальные погрешности ГАЛ; $w_5 = -\delta h_{\text{гп}}$ — погрешность глубиномера; $V_{\text{тг1}}, V_{\text{тг2}}$ — восточная и северная составляющие морских течений.

Модель погрешностей. В упрощенном виде модель погрешностей БГГК (без учета аномалий гравитационного поля Земли) может быть представлена следующими выражениями [4]:

$$\left. \begin{aligned} \dot{\alpha} &= \omega_{r2}\beta - \omega_{r1}\gamma + \text{tg}\varphi \frac{\Delta V_{r1}}{R} + \left(\Omega \cos \varphi + \frac{V_{r1}}{R \cos^2 \varphi} \right) \Delta \varphi - \Delta \omega_{r3}, \\ \dot{\beta} &= -\omega_{r2}\alpha + \omega_{r3}\gamma - \frac{\Delta V_{r2}}{R} - \Delta \omega_{r1}, \\ \dot{\gamma} &= \omega_{r1}\alpha - \omega_{r3}\beta + \frac{\Delta V_{r1}}{R} - \left(\Omega \sin \varphi \right) \Delta \varphi - \Delta \omega_{r2}, \\ \Delta \dot{V}_{r1} &= n_{r2}\alpha - n_{r3}\gamma + \Delta a_{r1} - \delta a_{Br1}, \\ \Delta \dot{V}_{r2} &= -n_{r1}\alpha + n_{r3}\beta + \Delta a_{r2} - \delta a_{Br2}, \\ \Delta \dot{V}_{r3} &= n_{r1}\gamma - n_{r2}\beta + \Delta a_{r3} - \delta a_{Br3} - \delta g, \\ \Delta \dot{h} &= \Delta V_{r3}. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Здесь $\Delta\varphi$ — погрешность навигационной системы счисления пути в выработке географической широты; $\Delta\omega_l, \Delta a_l$ ($l=\Gamma_1, \Gamma_2, \Gamma_3$) — проекции нескомпенсированных дрейфов ММГ и ММА на географические оси; $\delta a_{B\Gamma_1}, \delta a_{B\Gamma_2}, \delta a_{B\Gamma_3}$ — погрешности компенсации составляющих кориолисова ускорения по соответствующим осям; $\delta g \cong -2\zeta^2 \Delta h$ — погрешность компенсации ускорения силы тяжести; R — средний радиус Земли; Ω — угловая скорость суточного вращения Земли; ζ — шулеровская частота; ω_l и n_l ($l=\Gamma_1, \Gamma_2, \Gamma_3$) — текущие значения составляющих вектора угловой скорости вращения географического трехгранника и вектора кажущегося ускорения.

При формировании расчетной модели погрешностей навигационного режима работы БГГК использовались также следующие аппроксимации:

— смещения нулей ММА $\Delta\bar{a}_0$ и ММГ $\Delta\bar{\omega}_0$ были аппроксимированы (из-за отсутствия достоверных данных об их спектральном составе) соответствующими винеровскими процессами;

— проекции скорости морских течений аппроксимированы марковскими процессами первого порядка с параметрами $\sigma = 0,2$ узла, $\mu = 1/5400$ с⁻¹;

— погрешности в счислении координат места и уходы БЭСГ в инерциальной СК аппроксимированы дискретными белыми шумами с известными дисперсиями на частоте формирования измерений.

В таком случае расчетная модель погрешностей БГГК будет иметь следующий вид:

$$\begin{aligned} \mathbf{x}_{k+1} &= \Phi_{k+1/k} \mathbf{x}_k + \Gamma_{k+1} \mathbf{w}_k, \\ \mathbf{z}_{k+1} &= \mathbf{H}_{k+1} \mathbf{x}_{k+1} + \mathbf{v}_{k+1}, \end{aligned} \quad (5)$$

где

$$\mathbf{x} = [\alpha \quad \beta \quad \gamma \quad \Delta V_{\Gamma_1} \quad \Delta V_{\Gamma_2} \quad \Delta V_{\Gamma_3} \quad \Delta h \quad \Delta\bar{\omega}_{01} \quad \Delta\bar{\omega}_{02} \quad \Delta\bar{\omega}_{03} \quad \Delta\bar{a}_{01} \quad \Delta\bar{a}_{02} \quad \Delta\bar{a}_{03} \quad V_{\Gamma_1} \quad V_{\Gamma_2}]^T \quad (6)$$

— вектор состояния системы; $\Phi_{k/k+1}$ — переходная на шаге измерений $T_z = t_{k+1} - t_k$ матрица состояния системы (5),

$$\begin{aligned} \Phi_{j/j+1} &\cong \mathbf{E}_{n \times n} + \mathbf{F}(t_j) dT + \frac{1}{2} [\mathbf{F}(t_j) dT]^2 + \dots; \\ \Phi_{k/j+1} &= \Phi_{j/j+1} \Phi_{k/j}; \end{aligned}$$

при $j = k$ $\Phi_{k/j+1} = \Phi_{k/k+1}$ — искомое значение переходной матрицы Φ_{k+1} ; $\Phi_{k/j} = \mathbf{E}_{n \times n}$. Здесь $\mathbf{E}_{n \times n}$ — единичная (15×15)-матрица; j — оператор дискретности на рабочей частоте dT ; k — оператор дискретности на частоте измерений Tz ; $\mathbf{F}(t_j)$ — матрица динамики системы, соответствующая модели (4) и принятым допущениям; $\Gamma_{k+1} \cong \Phi_{k+1} dT$ — матрица, определяющая влияние вектора входных шумов \mathbf{w}_k с ковариациями \mathbf{Q}_k ; \mathbf{H}_{k+1} — матрица измерений, соответствующая уравнениям (2), (3).

Результаты моделирования. Для анализа точности БГГК в навигационном режиме работы в полярных широтах ($\varphi = 85^\circ$) осуществлялось численное моделирование задачи ориентации в среде MatLab с использованием пакета Simulink. При этом решалась задача оценивания вектора состояния (6) при измерениях (1) и (3).

Принимались следующие исходные значения для БЭСГ:

— начальная ориентация вектора кинетического момента БЭСГ — в плоскости земного экватора с погрешностью выставки около 15', погрешности начальной калибровки коэффициентов его модели ухода — 0,03 град/ч;

погрешности ММГ в проекциях на оси ($l = o_1, o_2, o_3$) объекта:

- нестабильность масштабных коэффициентов — случайные величины с уровнем 0,3 %;
- $\Delta\bar{\omega}_l$ — систематические составляющие дрейфов, которые характеризуют смещение нулей от пуска к пуску — случайные величины с уровнем 40 град/ч;
- $\Delta\omega_l$ — случайные составляющие дрейфов, которые характеризуют дрейф нуля в пуске — марковские процессы первого порядка $\sigma=6$ град/ч, $\mu=1/600$ с⁻¹;
- флуктуационные составляющие дрейфов — дискретные белые шумы на рабочей частоте $\sigma=100$ град/ч;

погрешности ММА в проекциях на оси ($l = o_1, o_2, o_3$) объекта:

- нестабильность масштабных коэффициентов линейных акселерометров — случайные величины с уровнем 1 %;
- $\Delta\bar{a}_l$ — смещение нулей линейных акселерометров — случайные величины с уровнем 0,01 м/с²;
- Δa_l — дрейфы нулей линейных акселерометров — марковские процессы первого порядка $\sigma=0,003$ м/с², $\mu=0,01$ с⁻¹;
- флуктуационные составляющие погрешностей акселерометров — дискретные белые шумы на рабочей частоте $\sigma=0,1$ м/с²;

гидроакустический лаг:

- флуктуационные составляющие погрешностей $\sigma=0,1$ м/с.

На рис. 2 приведен график погрешности БГГК по курсу и углам качки при работе в навигационном режиме.

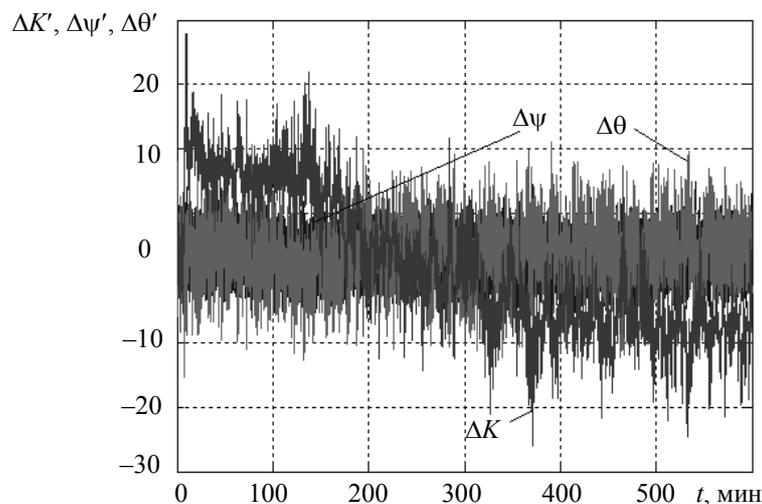


Рис. 2

В работе рассмотрена схема построения бескарданного гироскопизонта на бескарданном электростатическом гироскопе и микромеханических датчиках, приведены алгоритмы навигационного режима работы. Показано, что за 10 часов работы погрешности бескарданного гироскопизонта не превышают по курсу — 20, а по углам качки — 15 угловых минут.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Интегрированная система Seapath 200. Product Manuals — Seapath 200. Seatex AS. Trondheim, Norway, 1998.
2. Емельянец Г. И., Лочехин А. В. Начальная выставка и калибровка бескарданного гироскопизонта на электростатическом гироскопе и микромеханических датчиках // Науч.-технич. вестн. СПбГУ ИТМО. 2009. № 5. С. 62—69.

3. Landau B. Ye., Gurevich S. S., Yemelyantsev G. I., Levin S. L., Odintsov B. V., Romanenko S. G. The Results of Calibration of Electrostatic Gyroscopes in a Strapdown Attitude Reference System // Intern. Conf. on Integrated Navigation Systems. St. Petersburg, Russia, 2008. P. 132—138.
4. Анучин О. Н., Емельянцеv Г. И. Интегрированные системы ориентации и навигации для морских подвижных объектов. СПб: ЦНИИ „Электроприбор“, 2003. 390 с.
5. Блажнов Б. А., Волынский Д. В., Емельянцеv Г. И., Несенюк Л. П., Степанов А. П. Интегрированная инерциально-спутниковая система ориентации и навигации с микромеханическим инерциальным модулем. Результаты испытаний на автомобиле // Гироскопия и навигация. 2008. № 4(63). С. 77.
6. Емельянцеv Г. И., Ландау Б. Е., Левин С. Л., Романенко С. Г. Об уточнении модели дрейфов электростатических гироскопов бескарданной инерциальной системы ориентации и о методике их калибровки на стенде и в условиях орбитального космического аппарата // Гироскопия и навигация. 2008. № 1(60). С.43—54.

Сведения об авторах

- Геннадий Иванович Емельянцеv** — д-р техн. наук, профессор; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра информационно-навигационных систем;
E-mail: Emel@mail.ifmo.ru
- Алексей Владимирович Лочехин** — аспирант; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра информационно-навигационных систем; E-mail: alex@infom.su

Рекомендована кафедрой
информационно-навигационных систем

Поступила в редакцию
29.04.10 г.