

В. Г. Тершин, Г. А. Иванова

ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ГИРОСКОПОВ В ИНКЛИНОМЕТРИЧЕСКОЙ ТЕХНИКЕ

Рассмотрены особенности и перспективы использования волоконно-оптических гироскопов (ВОГ) в инклинометрических системах. Сделана оценка влияния погрешности масштабного коэффициента ВОГ на точность определения азимута. Даны рекомендации по минимизации погрешности ВОГ, обусловленной отклонением параметров прибора от их номинальных значений. *Волоконно-оптический гироскоп; системы подземной навигации; гироскопический инклинометр*

Проблема эффективного контроля пространственного положения ствола скважины в современной нефтегазодобывающей промышленности относится к числу наиболее важных и актуальных. Это обусловлено сложными эксплуатационными условиями (большой глубиной и труднодоступностью залегания продуктивных залежей), а также тенденцией повышения требований к точности определения профиля буровых скважин. Решение проблемы непосредственно связано с разработкой измерительно-вычислительной аппаратуры, позволяющей достаточно точно и оперативно получать необходимую информацию и обладающей при этом высокой надежностью. Для определения параметров искривленных скважин используется инклинометр, перемещающийся в составе бурового инструмента или опускаемый на кабеле в скважину. В настоящее время существует широкий спектр датчиков информации, применение которых в инклинометрических системах позволяет решать задачи подземной навигации. В работе рассматриваются особенности и перспективы использования ВОГ в гироскопических инклинометрах.

1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА

Задача ориентации объекта решается с использованием согласованных измерений, как минимум, двух неколлинеарных векторов в системах координат, взаимная ориентация которых осуществляется при помощи азимута α , зенитного угла θ и визирного угла φ (рис. 1), причем

$$\alpha = \arctg\left(\frac{\vec{b}_3 \cdot \vec{e}_2}{\vec{b}_3 \cdot \vec{e}_1}\right), \quad \varphi = \arctg\left(-\frac{\vec{b}_2 \cdot \vec{e}_3}{\vec{b}_1 \cdot \vec{e}_3}\right), \quad (1)$$

$$\theta = \arctg\left[\frac{1}{\vec{b}_3 \cdot \vec{e}_3} \cdot \sqrt{(\vec{b}_3 \cdot \vec{e}_3)^2 + (\vec{b}_1 \cdot \vec{e}_3)^2}\right],$$

где \vec{e}_i, \vec{b}_j ($i, j = 1, 2, 3$) – орты неподвижного R_e и подвижного R_b базисов, соответствующих правым прямоугольным системам координат.

Заметим, что вектор \vec{e}_1 направлен по касательной к географическому меридиану на север; \vec{e}_2 – по касательной к географической параллели на восток; \vec{e}_3 – по гравитационной вертикали к центру Земли. Векторы \vec{b}_1, \vec{b}_2 определяют расположение базовых поверхностей, используемых при установке измерительных модулей на шасси инклинометра; вектор \vec{b}_3 направлен по продольной оси цилиндрического корпуса инклинометра от устья скважины к забою [1].

Принципы построения конкретных алгоритмов вычисления параметров (1) сводятся к выявлению зависимостей \vec{e}_i ($i = 1, 2, 3$) от измеряемых физических величин, в качестве которых используются напряженность геомагнитного поля, ускорение свободного падения \vec{g} , угловая скорость вращения Земли $\vec{\omega}$. Наиболее широкое распространение в нашей стране и за рубежом получили магнитометрические инклинометры с неподвижно закрепленными на шасси тремя феррозондами и тремя акселерометрами [2].

Необходимость определения параметров ориентации скважин, пробуренных в средах с аномальными магнитными свойствами, а также обсаженных стальными трубами, приводит к целесообразности применения гироскопических инклинометров [1, 3].

Единичные векторы ускорения силы тяжести и угловой скорости вращения Земли в координатном базисе R_e записываются следующим образом:

$$\vec{q}^o = (0, 0, 1), \quad (2)$$

$$\vec{\omega}^o = (\cos \varphi_{ш}, 0, -\sin \varphi_{ш}),$$

где $\varphi_{ш}$ – географическая широта местности.

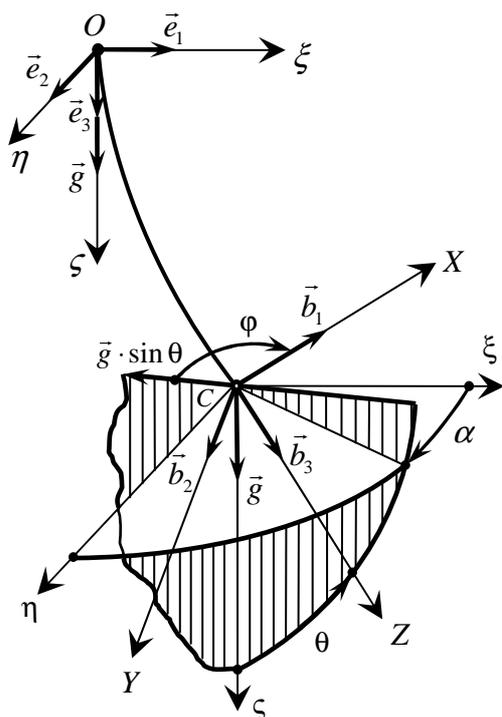


Рис. 1

В работе [1] показано, что в рассматриваемом случае значения азимута, визирного и зенитного углов определяются выражениями:

$$\alpha = \arctg \left[\frac{(A_1 D_2 - A_2 D_1) \sqrt{A_1^2 + A_2^2 + A_3^2}}{(A_1^2 + A_2^2) D_3 - D_2 A_2 A_3 - D_1 A_1 A_3} \right], \quad (3)$$

$$\varphi = \arctg \left(-\frac{A_2}{A_1} \right), \quad \theta = \arctg \left[\frac{1}{A_3} \sqrt{A_1^2 + A_2^2} \right],$$

где A_i, D_j ($i, j = 1, 2, 3$) – выходные сигналы, поступающие с акселерометров и датчиков угловых скоростей (ДУС), оси чувствительности которых взаимно ортогональны и совпадают с направлениями ортов \vec{b}_j соответственно.

Приведенные соотношения позволяют уточнить алгоритмы обработки сигналов, поступающих с триад акселерометров и ДУС, с целью нахождения параметров ориентации инклинометра в искривленной скважине.

2. ОСОБЕННОСТИ ПРИБОРА НА БАЗЕ ВОГ И ОЦЕНКА ЕГО ПОГРЕШНОСТИ

Среди источников информации о векторе угловой скорости вращения Земли особый интерес, с точки зрения использования в сложных эксплуатационных условиях, представляют ВОГ [4, 5]. К числу достоинств ДУС этого типа можно отнести: малые габаритно-массовые и энергетические характеристики, высокую точность, возможность работы в условиях больших пере-

грузок, широкий диапазон измеряемых параметров, малое время готовности к работе. Исследованиями и разработкой приборов на базе ВОГ заняты специалисты ведущих фирм России, США, Германии, Франции, Японии, Израиля, среди которых следует назвать следующие: ООО «Физоптика» и ООО «Оптолинк» (г. Москва), Пермскую научно-производственную приборостроительную компанию (ПНППК), «Honeywell», «KVN Industries», «Litton», «Rockwell International», «Northrop», Лабораторию им. Ч. Дрейпера Массачусетского технологического института, «Litef», «Sagem», «Mitsubishi Phrecision Co» и «Cielo».

Сущность эффекта, положенного в основу работы ВОГ, состоит в том, что время прохождения потока квантов по замкнутому контуру во вращающейся системе координат отличается от времени прохождения потока квантов по такому же контуру в неподвижной системе координат. Оптический контур такого гироскопа образован сверхтонким оптоволоком, сохраняющим поляризацию излучения, намотанным на катушку. Излучение от источника (например, от люминесцентного диода) подается на светоделитель и разделяется на два потока лучей. Эти лучи, обходя замкнутый оптоволоконный контур, подаются на фотодетектор, на выходе которого появляется электрический сигнал. После соответствующей обработки сигнала с помощью блока электроники можно получить информацию о скорости поворота волоконно-оптического контура вокруг измерительной оси прибора, которая перпендикулярна плоскости витков оптоволоконной катушки. Различия фаз электромагнитных световых колебаний (фазовый сдвиг Саньяка в радианах), регистрируемые фотодетектором, определяются следующим образом:

$$\varphi = \frac{4S \cdot N}{c \cdot \lambda} \cdot \omega_z = \frac{2L \cdot R_c}{c \cdot \lambda} \cdot \omega_z, \quad (4)$$

где S – площадь, охваченная витком со средним для катушки радиусом R_c ; N – общее число витков оптического волокна, намотанного на катушку; ω_z – угловая скорость вращения основания вокруг измерительной оси прибора; c – скорость света в оптическом волокне; λ – длина волны электромагнитных колебаний; L – общая длина оптического контура [6].

Величины L и R_c , учитывая геометрические параметры катушки, можно вычислить по формулам:

$$L = 4 \frac{k_3 \cdot h}{d^2} \cdot (R^2 - r^2), \quad R_c = \frac{1}{2}(R + r), \quad (5)$$

где R , r – наружный и внутренний радиусы намотки; h – высота окна намотки; d – диаметр оптического волокна; k_3 – коэффициент заполнения.

Учитывая выражения (5), преобразуем формулу (4) к виду

$$\varphi = \frac{4 \cdot k_3 \cdot h}{c \cdot \lambda \cdot d^2} \cdot (R + r) \cdot (R^2 - r^2) \cdot \omega_z. \quad (6)$$

Изменения величин R , r , h , d , λ относительно их расчетных значений приведут к погрешности прибора

$$\Delta\varphi = \varphi - \varphi_0, \quad (7)$$

где φ_0 – фазовый сдвиг Саньяка, соответствующий номинальным значениям R_0 , r_0 , h_0 , d_0 , λ_0 .

С целью определения погрешности $\Delta\varphi$ разложим выражение для фазы Саньяка в ряд Тейлора в окрестности указанных номинальных значений. Ограничиваясь линейными членами и заменяя дифференциалы конечными приращениями, в качестве которых принимаем ΔR , Δr , Δh , Δd , $\Delta\lambda$, получим

$$\Delta\varphi = \left(\frac{\partial\varphi}{\partial R}\right)_o \Delta R + \left(\frac{\partial\varphi}{\partial r}\right)_o \Delta r + \left(\frac{\partial\varphi}{\partial h}\right)_o \Delta h + \left(\frac{\partial\varphi}{\partial d}\right)_o \Delta d + \left(\frac{\partial\varphi}{\partial \lambda}\right)_o \Delta\lambda. \quad (8)$$

Индекс «о» у частных производных означает, что их следует вычислять при номинальных значениях рассматриваемых параметров.

Взяв в соответствии с (8) необходимые частные производные от формулы (6), после некоторых преобразований найдем

$$\Delta\varphi = \varphi_0 \left\{ \frac{(3R_0 - r_0)\Delta R + (R_0 - 3r_0)\Delta r}{(R_0^2 - r_0^2)} + \frac{\Delta h}{h_0} - 2 \frac{\Delta d}{d_0} - \frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} \right\}, \quad (9)$$

Таким образом, относительную погрешность ДУС на базе ВОГ можно оценить по формуле

$$\varepsilon = \frac{(3R_0 - r_0) \cdot \Delta R + (R_0 - 3r_0) \cdot \Delta r}{(R_0^2 - r_0^2)} + \frac{\Delta h}{h_0} - 2 \frac{\Delta d}{d_0} - \frac{\Delta\lambda}{\lambda_0}. \quad (10)$$

В качестве примера рассмотрим ВОГ, который имеет следующие параметры:

$$R_0 = 30 \text{ мм}; \quad r_0 = 12 \text{ мм}; \quad h_0 = 15 \text{ мм};$$

$$d_0 = 84 \text{ мкм}; \quad \lambda_0 = 850 \text{ нм}.$$

Пусть отклонения перечисленных параметров соответственно равны:

$$\Delta R = 0,3 \text{ мм}; \quad \Delta r = 0,12 \text{ мм}; \quad \Delta h = 0,15 \text{ мм};$$

$$\Delta d = 2 \text{ мкм}; \quad \Delta\lambda = 15 \text{ нм}.$$

Тогда, согласно формуле (10), относительная погрешность ДУС составляет $\varepsilon = 2,5\%$.

Следовательно, для уменьшения погрешности прибора на базе ВОГ необходимы меры по обеспечению высокой стабильности его параметров. В первую очередь это касается оптического волокна и длины волны источника излучения. Стабильность длины волны источника излучения, от которого зависит вводимая в оптический контур мощность, определяет точность масштабного коэффициента ДУС. Допустимый уровень флюктуаций выходного сигнала (шум) ограничивается чувствительностью фотодетектора. В приборе наблюдается множество физических явлений: поляризационные эффекты, термооптический, магнитооптический, нелинейный эффект Керра и пр. Вызванный ими дрейф нуля может существенно превосходить полезный сигнал. Решение проблемы повышения точности ВОГ неразрывно связано с изучением влияния на прибор среды его функционирования и в особенности температуры [5–9].

3. МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ И ПРИЛОЖЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

С целью оценки погрешности измерений инклинометра, в состав которого входит ВОГ, и выявления влияния погрешностей последнего на точность инклинометрической системы выполнено математическое моделирование. В соответствии с рис. 1, сигналы с акселерометра имеют вид:

$$\begin{aligned} A_1 &= -k_A \cdot g \cdot \sin \theta \cdot \cos \varphi, \\ A_2 &= k_A \cdot g \cdot \sin \theta \cdot \sin \varphi, \\ A_3 &= k_A \cdot g \cdot \cos \theta, \end{aligned} \quad (11)$$

где k_A – масштабный коэффициент каждого акселерометра.

Подставляя (11) в (3), преобразуем формулу для нахождения азимута следующим образом:

$$\alpha = \arctg \left\{ \frac{(D_1 \cdot \sin \varphi + D_2 \cdot \cos \varphi)}{[(D_2 \cdot \sin \varphi - D_1 \cdot \cos \varphi) \cdot \cos \theta - D_3 \cdot \sin \theta]} \right\}, \quad (12)$$

причем

$$D_i = k_D \cdot \omega_i \quad (i = 1, 2, 3), \quad (13)$$

где k_D – масштабный коэффициент каждого ДУС; ω_i – проекции угловой скорости Земли на соответствующие оси чувствительности используемых приборов.

С учетом относительной погрешности ε_i ($i = 1, 2, 3$) масштабного коэффициента прибора, выходной сигнал с i -го ДУС имеет вид

$$D'_i = D_i \cdot (1 + \varepsilon_i). \quad (14)$$

Подставляя соответствующие значения выходных сигналов ДУС в формулу (12), можно определить зависимость абсолютной погрешности азимута $\Delta\alpha$ от относительной погрешности масштабного коэффициента прибора.

На рис. 2 представлены результаты компьютерного моделирования в среде Matlab 6.5 для следующих значений: $\varphi_{ш} = 57^\circ$, $\alpha = 45^\circ$, $\theta = 0 - 180^\circ$, $\varphi = 0 - 360^\circ$. Используемый в инклинометрической системе прибор имел погрешность масштабного коэффициента $\varepsilon = 2,5\%$ (при этом учтены различные способы установки ДУС в измерительном модуле). В результате расчета был получен массив значений $\Delta\alpha$ при различных комбинациях визирных и зенитных углов. Для оценки наихудшей ситуации работы инклинометрической системы из массива выделяются максимальные значения $\Delta\alpha$, по которым считается среднее значение погрешности азимута $\langle\alpha\rangle$.

Приведенные на рис. 2 зависимости свидетельствуют о том, что максимальная абсолютная погрешность определения азимута не превышает $1,3^\circ$, а следовательно, вполне удовлетворяет требованиям по точности, предъявляемым к современной инклинометрической технике согласно технической инструкции по проведению геофизических исследований и работ приборами на кабеле в нефтяных и газовых скважинах.

Разработанная схема моделирования измерительно-вычислительного комплекса позволила выявить зависимость усредненной погрешности определения азимута $\langle\alpha\rangle$ инклинометрической системы от относительной погрешности ε масштабного коэффициента, используемого ДУС для месторождений, находящихся в Тюмени и республике Башкортостан ($\varphi_{ш} = 57^\circ$), Нижневартовске ($\varphi_{ш} = 60^\circ$), Ноябрьске ($\varphi_{ш} = 63^\circ$) и Ямало-Ненецком автономном округе ($\varphi_{ш} = 73^\circ$).

Представленные на рис. 3 графики свидетельствуют:

- о линейной зависимости усредненной погрешности определения азимута инклинометрической системы от относительной погрешности масштабного коэффициента используемого прибора;

- о возможности использования в измерительном модуле инклинометра ДУС на базе ВОГ, относительная погрешность масштабного коэффициента которых не превышает 5%.

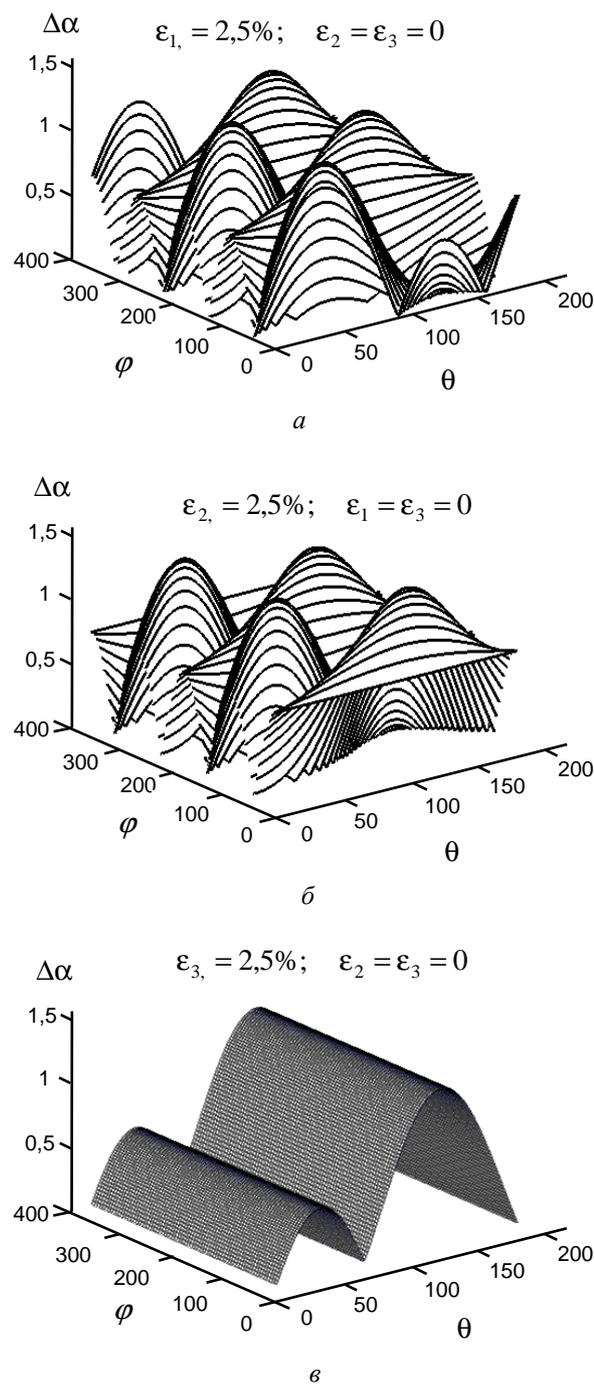


Рис. 2

Современные инклинометры имеют диаметр от 36 до 100 мм, предназначены для работы в условиях высоких температур ($80 - 200^\circ\text{C}$) и давления от 60 до 120 МПа. Обзор современного рынка ВОГ, выполненный в работах [5, 7], позволяет выделить ряд перспективных моделей для использования в подземной навигации (например, ВГ941-ЗАС, ВГ941-ЗАМ, ВГ941-ЗА (Б) фирмы «Физоптика»).

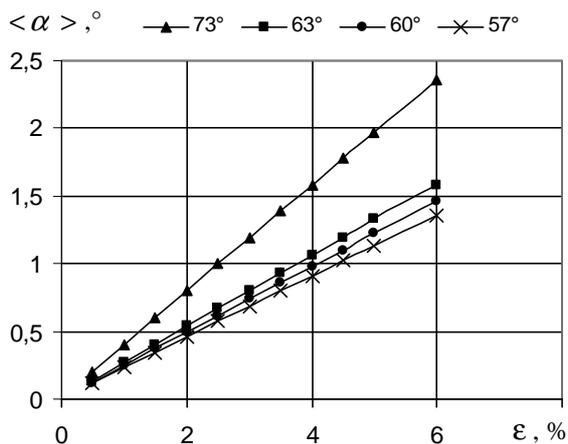


Рис. 3

Наиболее уязвимым местом ВОГ, с точки зрения работы в условиях высоких температур, являются низкотемпературные припои, используемые в производстве суперлюминесцентных диодов, а также при стыковке оптического волокна с источником излучения. Необходимо также отметить, что температурные воздействия, кроме непосредственного воздействия на характеристики ВОГ, влияют также на проявление различных физических эффектов (Керра, Рэлея, Фарадея и пр.), а уже через них – на точность прибора.

Возможными путями решения проблемы могут быть:

- изменение технологии производства ВОГ (проработка вопросов пайки оптического волокна);
- использование источников излучения, имеющих более широкий диапазон рабочих температур;
- введение терморегулирования и схемно-алгоритмической компенсации температурной зависимости [5, 7].

Особое внимание следует уделять оптимизации стоимостных, точностных, энергетических и габаритно-массовых характеристик приборов на базе ВОГ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Учитывая многочисленные достоинства ВОГ, результаты компьютерного моделирования и тот факт, что многие из существующих проблем, связанных с использованием этого типа прибора в подземной навигации, близки к своему решению, можно говорить о больших перспективах внедрения ВОГ в инклинометрическую технику. Для уменьшения погрешностей прибора на базе ВОГ необходимы меры по обеспечению высокой стабильности его параметров, а также совершенствование технологии

производства. Высокие метрологические характеристики ВОГ, позволяющие применять их в гироскопических инклинометрах, достигаются введением алгоритмической компенсации температурной зависимости, а также оптимальной фильтрацией оптических и электрических сигналов. Необходимо стимулировать фирмы-производители ВОГ к разработке новых малогабаритных конструкций с необходимыми техническими характеристиками для использования в системах подземной навигации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алимбеков Р. И., Рогатых Н. П., Терешин В. Г. Построение инклинометрических комплексов с использованием инерциальных технологий // Вестник УГАТУ. 2002. № 2. С. 145–149.
2. Кузеванов С. А. Оптимальный выбор датчиков для инклинометров // Каротажник. 2007. № 81. С. 103–110.
3. Современные информационно-измерительные комплексы систем подземной навигации и ориентации / Я. И. Биндер [и др.] // Гироскопия и навигация. 2003. № 1. С. 110–123.
4. Гироскопический инклинометр и способ определения угловой ориентации скважин / Е.Ф. Белов [и др.] // Патент России № 2282717. 2006. Бюл. № 24.
5. Соколов Д. А. Перспективы использования малогабаритных волоконно-оптических гироскопов в гироскопии. // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. 2007. Вып. № 44. С. 154–159.
6. Савельев А. М., Соловьева Т. И. Волоконно-оптические гироскопы // Зарубежная радиоэлектроника. 1982. № 6. С. 55–76.
7. Терешин В. Г., Иванова Г. А. Развитие теории и практики волоконно-оптических гироскопов. // Уфа: УГАТУ, 2008. 42 с. Деп. в ВИНТИ 03.06.08, № 478–В2008.
8. Шереметьев А. Г. Волоконный оптический гироскоп. М.: Радио и связь, 1987. 151 с.
9. Волоконно-оптические датчики / Т. Окоси [и др.]. Л.: Энергоатомиздат, 1990. 256 с.

ОБ АВТОРАХ

Терешин Валерий Глебович, проф. каф. теор. мех., действ. чл. Международной академии навигации и управления движением. Дипл. инж.-электромеханик (УАИ, 1973). Д-р техн. наук по гироскопии (ЮУрГУ, 1993). Иссл. в обл. механики гироскопических приборов и устройств.

Иванова Галина Алексеевна, асп. той же каф. Дип. инженер по средствам связи с подвижными объектами (УГАТУ, 2006). Готовит дис. по использованию гироскопических приборов в системах ориентации и навигации подвижных объектов.