

ОСОБЕННОСТИ КОНСТРУИРОВАНИЯ ЧУВСТВИТЕЛЬНОГО ЭЛЕМЕНТА МИКРОМЕХАНИЧЕСКОГО ГИРОСКОПА

М.И. Евстифеев, А.А. Унтилов

Рассмотрены особенности конструирования чувствительного элемента микромеханического гироскопа. Приведены требования к параметрам конструкции. Проведен анализ влияния технологических особенностей материала и инструментальных погрешностей изготовления.

Введение

В настоящее время все большее внимание уделяется разработке микромеханических гироскопов (ММГ), выполненных с использованием технологий микроэлектронной промышленности. Несмотря на невысокую точность, ММГ находят применение в автомобильной промышленности, при создании нового поколения навигационного оборудования, в разработках робототехнических устройств и спортивного снаряжения, в медицинской промышленности и при выпуске товаров широкого потребления [1]. Принцип работы большинства ММГ аналогичен осцилляторным вибрационным гироскопам и основан на измерении сил Кориолиса от внешней угловой скорости Ω (рис. 1). Для увеличения выходного сигнала и повышения чувствительности в ММГ, как правило, используется резонансная настройка первичных f_1 и вторичных f_2 колебаний инерционной массы, при этом необходимо, чтобы амплитуда первичных колебаний инерционного тела и добротность по оси вторичных колебаний поддерживались на максимальном уровне, а собственная частота была минимальной [2]. Устранение противоречия между достижением высокой добротности и, соответственно, максимальной чувствительности и обеспечением требуемой полосы пропускания возможно при использовании интегрирующих свойств ММГ [3].

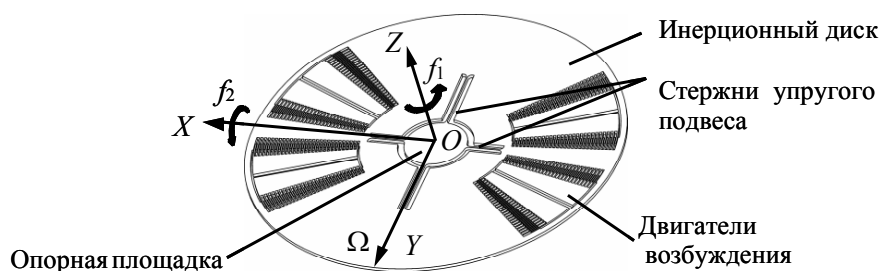


Рис. 1. Конструкция ротора ММГ: f_1 и f_2 – первичные и вторичные колебания; Ω – измеряемая угловая скорость основания

Постановка задачи

Разрабатываемые микромеханические гироскопы (ММГ) отличаются от традиционных гироскопических устройств рядом существенных факторов, которые следует принимать во внимание при проектировании. Проектирование ММГ требует решения ряда специфических задач конструкторско-технологического характера [4, 5], среди которых:

- построение расчетной схемы, адекватно описывающей характеристики подвеса;

- оптимизация параметров конструкции, обеспечивающая требуемые соотношения между собственными частотами колебательной системы и соответствующие формы колебаний;
- подбор материалов с необходимыми физическими характеристиками;
- достижение минимального порога чувствительности;
- обеспечение прочности конструкции в процессе эксплуатации;
- поиск способов уменьшения влияния технологических, температурных и иных факторов на точность и стабильность характеристик приборов.

При выполнении расчетов и разработке конструкции чувствительного элемента можно выделить следующие особенности проектирования упругого подвеса ММГ: неопределенность механических характеристик материала, использование планарных конструкций, учет возможной точности изготовления упругих элементов, оценка нелинейности упругих характеристик.

Особенности используемых материалов

При изготовлении инерционной массы ММГ толщиной несколько десятков микрометров преимущественно используется монокристаллический кремний. Среди преимуществ монокристаллического кремния следует отметить низкие внутренние потери, позволяющие достичь высокой добротности осцилляторов; высокий модуль Юнга, сравнимый с модулем Юнга стали; предел текучести, превышающий предел текучести стали [6, 7]. Однако существенным недостатком этого материала является анизотропия свойств (в том числе механических) в зависимости от кристаллографических направлений [8]. На рис. 2 приведено изменение модуля Юнга и коэффициента Пуассона на пластине с ориентацией (100).

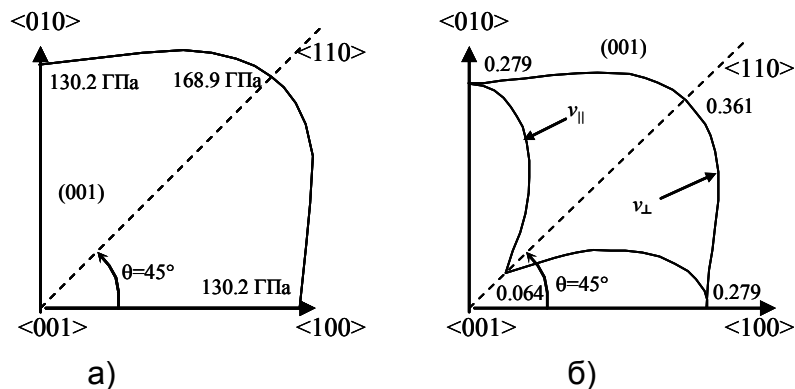


Рис. 2. Изменение модуля Юнга (а) и коэффициента Пуассона (б) на пластине с ориентацией (100).

При проектировании необходима информация о расположении упругого подвеса на пластине-заготовке, в противном случае ошибки в расчете собственных частот могут оказаться недопустимо большими. Исследования показывают, что соотношение между частотами первичных и вторичных колебаний может изменяться на 10% при одинаковой геометрии в зависимости от кристаллографического направления [9].

Несмотря на высокие конструкционные характеристики, монокристаллический кремний хрупок, вследствие чего следует избегать конструкций, в которых чувствительный элемент может испытывать удары о корпус или подложку.

При расчете параметров следует уделить внимание таким вопросам, как подбор материалов с одинаковыми коэффициентами теплового расширения [10], учет изменения модуля упругости и добротности вследствие изменения температуры [6,11], разра-

ботка адекватной модели тепловых погрешностей прибора с целью их компенсации [12], разработка систем терморегулирования [13].

Температурные зависимости модуля упругости и добротности приводят к погрешностям прибора вследствие изменения геометрических размеров и упругих характеристик конструкции. При этом происходит изменение частотных свойств и добротности, зазоров в электрических датчиках прибора и соответственно энергетических характеристик. В конструкции появляются температурные градиенты и возникают внутренние механические напряжения, вследствие которых возможно появление перекосов и нарушения геометрии. Изменение собственных частот и соотношение между ними при изменении температуры для рассматриваемой конструкции приведено на рис. 3 [14].

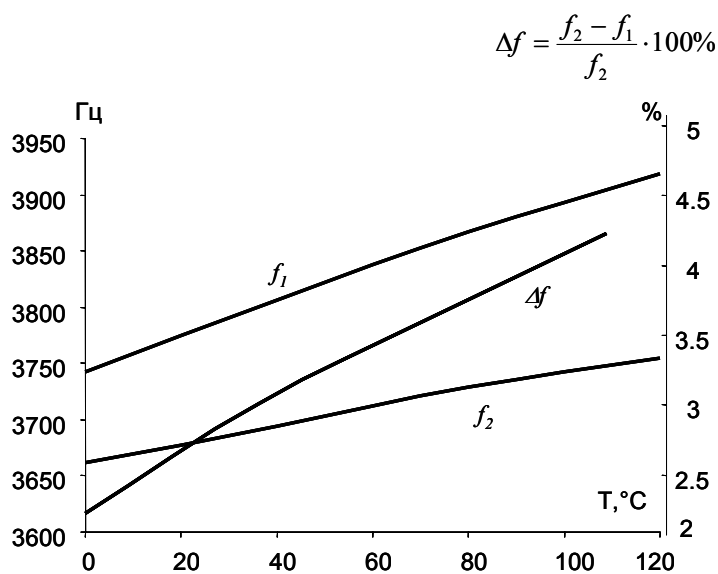


Рис. 3. Изменение собственных частот чувствительного элемента ММГ f_1 , f_2 и соотношения между ними Δf при изменении температуры

Особенности технологии изготовления

Планарная технология, используемая при изготовлении ММГ, накладывает определенные ограничения на выбор конструктивной схемы. Вследствие технологических особенностей кремниевые ММГ представляют собой плоские конструкции, у которых толщина в 100–200 раз меньше длины. Это обстоятельство затрудняет обеспечение требуемых упругих характеристик и исключает использование пространственных конструктивных схем.

Точность расчетных моделей связана с учетом возможной точности изготовления упругих элементов подвеса. В конструкциях ММГ вследствие группового построения технологического процесса, большой серийности производства и малых размеров обеспечить допуски изготовления на уровне долей процента от геометрического размера невозможно и экономически нецелесообразно. Технологические допуски приводят к расстройке резонанса и резкому изменению масштабного коэффициента [15]. Для ММГ с резонансной настройкой необходима регулировка частот путем использования электрической системы создания положительной или отрицательной жесткости.

Отклонение от номинальных значений размеров чувствительного элемента приводит к статическому и динамическому дисбалансам, перекосам ротора, несовпадению кристаллографических направлений с осями прибора. Помимо расстройки резонанса, такие погрешности приводят к появлению «нулевого» сигнала.

Проблемы стабильности характеристик ММГ связаны в основном с непостоянством геометрических размеров, упругих свойств и добротности. Коэффициент добротности для данного класса приборов является метрологическим параметром, от которого зависит стабильность показаний прибора. Диссипация энергии колебаний связана с потерями на газовое трение, поверхностными потерями, потерями из-за связанности различных типов колебаний, термоупругим демпфированием и прочим [6]. Снижение потерь от взаимодействия с газовой средой требует вакуумирования внутренней полости элемента [16]. Одним из принципиальных вопросов разработки конструкции является использование технологии вакуумирования на уровне вафли, что позволяет снизить стоимость и повысить надежность прибора [17]. При конструировании ММГ следует принимать во внимание особенности технологии изготовления и исключать возможность адгезионного слипания элементов конструкций вследствие воздействия температур в процессе сварки и вакуумных ударов при герметизации.

Особенности конструкции чувствительного элемента

Одной из проблем разработки конструкции упругих подвесов является обеспечение линейности характеристик жесткости по осям первичных и вторичных колебаний. Для подвесов, состоящих из прямых стержней (см. рис. 1), восстанавливающая сила подвеса является нелинейной и содержит кубические члены жесткости подвеса. Это приводит к возникновению неустойчивых колебательных режимов и возможности перехода системы из одного положения в другое без каких-либо дополнительных внешних воздействий [18]. Для ММГ компенсационного типа нелинейность упругого подвеса оказывает существенное влияние только на первичные колебания.

Одним из существенных факторов, влияющих на параметры разрабатываемого ММГ, является порог чувствительности [19]. Обеспечение высокой точности измерения угловой скорости основания требует создания высокодобротных, колеблющихся с большой амплитудой осцилляторов и уменьшения практически до нуля механических и электрических шумов, что может быть достигнуто путем тщательного проектирования всех элементов прибора.

Условия эксплуатации ММГ предполагают наличие интенсивных инерционных воздействий – высокочастотной вибрации и ударов. При проектировании упругого подвеса ММГ следует учитывать моменты сил упругости, возникающие из-за деформаций конструкции в условиях угловой и поступательной вибрации. Наибольшее влияние на показания ММГ с угловыми движениями инерционного тела оказывает воздействие поступательной вибрации на частоте, равной половине частоты вторичных угловых колебаний [20]. Это требует разработки равножестких конструкций упругих подвесов, что затрудняется использованием планарной технологии.

Конструкции ММГ должны иметь собственные частоты выше диапазона вибрации и выдерживать ударные воздействия величиной в десятки тысяч g . Большая прочность конструкций обусловлена малой массой инерционного тела и высокими частотами колебаний подвеса на уровне килогерц. При конструировании необходимо предусматривать установку упоров – ограничителей перемещения элементов конструкции для предотвращения замыкания контактных проводников.

Использование трехмерного моделирования и конечно-элементного анализа позволяет значительно сократить время разработки и расчета нового варианта конструкции ММГ, избежать итераций методом «проб и ошибок» [14]. Тем не менее, точность расчета конечна и составляет несколько процентов от номинального значения частоты.

Проблемы расчета конструкций связаны с необходимостью создания расчетных моделей, описывающих системы с распределенными параметрами, и использования программ конечно-элементного анализа [21]. Для разработки конструкции и решения

обозначенных выше проблем могут быть использованы как универсальные (ANSYS, Nastran, Pro/MECHANICA), так и специализированные программы (CoventorWare, MEMSCap).

Литература

1. Пешехонов В.Г. Гироскопы начала XXI века // Гироскопия и навигация. 2003. № 4. С.5–18.
2. Кучерков С.Г., Шадрин Ю.В. К вопросу о выборе конструктивных параметров микромеханического кольцевого гироскопа вибрационного типа / Материалы III конференции молодых ученых «Навигация и управление движением». СПб.: ЦНИИ «Электроприбор», 2001. С.94–101.
3. Кучерков С.Г. Использование интегрирующих свойств вибрационного микромеханического гироскопа с резонансной настройкой для построения датчика угловой скорости компенсационного типа. // Гироскопия и навигация. 2002. №2. С.12–18.
4. Северов Л.А., Пономарев В.К., Панферов А.И., Сорокин А.В., Кучерков С.Г., Лучинин В.В., Корляков А.В.. Микромеханические гироскопы: конструкции, характеристики, технологии, пути развития. // Известия вузов. Приборостроение. 1998. Т.41. №1–2. С.57–73.
5. Лестев А.М., Попова И.В., Евстифеев М.И. и др. Особенности микромеханических гироскопов. // Микросистемная техника. 2000. №4. С.16–18.
6. Duwel A. et al. Experimental Study of thermoelastic damping in MEMS gyros// Sensor and Actuators, 103, 2003,. pp.70-75.
7. Петерсен К.Э. Кремний как микромеханический материал. // ТИИЭР. 1982. Т.70. №5. С.5–49.
8. Kim J., Cho D., Muller R.S. Why is (111) silicon a better mechanical material for MEMS? / Proceedings of Transducers 2001: 11th International Conference on Solid State Sensors and Actuators, Munich, Germany, June 2001, pp. 662-665.
9. Унтилов А.А. Влияние анизотропии монокристаллического кремния на характеристики микромеханического гироскопа. / Навигация и управление движением: Материалы докладов VI конференции молодых ученых «Навигация и управление движением»/Под общ. ред. академика РАН В.Г.Пешехонова СПб.: ГНЦ РФ ЦНИИ «Электроприбор», 2005. С.154–161.
10. Ahn Y., Guckel H. Thermoelastic effect of silicon for strain sensing. J. Micromech. Microeng. 11 (2001) pp. 443–451.
11. Александров Л.Н., Зотов М.И. Внутреннее трение и дефекты в полупроводниках. Новосибирск: Наука, 1979.
12. Джашитов В.Э., Панкратов В.М. Математические модели теплового дрейфа гироскопических датчиков инерциальных систем. СПб.: ГНЦ РФ ЦНИИ «Электроприбор», 2001.. 150 с.
13. Барулина М.А., Джашитов В.Э., Панкратов В.М. Математические модели систем терморегулирования микромеханических гироскопов. // Гироскопия и навигация. 2002. №3. С. 48–59.
14. Евстифеев М.И., Унтилов А.А. Особенности проектирования чувствительного элемента микромеханического гироскопа / III международный симпозиум «Аэрокосмические приборные технологии» сборник материалов. СПб. 2-4 июня 2004. С.297–298.
15. Евстифеев М.И., Унтилов А.А. Требования к точности изготовления упругого подвеса микромеханического гироскопа. // Гироскопия и навигация. 2003. №2. С.24–31.

16. Кучерков С.Г. Определение необходимой степени вакуумирования рабочей полости осциллятора микромеханического гироскопа. // Гироскопия и навигация.. 2002. № 1. С. 52–56.
17. Goldberg H., Selvakumar A. Issues & challenges of MEMS wafer-level packaging// MicroNano, №9, 2003, p.8–9.
18. Davis W.O., Pisano A.P. Nonlinear Mechanics of Suspension Beams for a Micro-machined Gyroscopes//Modeling and Simulation of Microsystems 2001, pp.270–273.
19. Ayazi F., Najafi K. A HARPSS Polysilicon Vibrating Ring Gyroscope // IEEE, Journal of Microelectromechanical Systems. 2001. Vol.10. №2. P.169–179.
20. Евстифеев М.И. Погрешности микромеханического гироскопа на вибрирующем основании. // Гироскопия и навигация. 2002. №2. С.19–25.
21. Евстифеев М.И., Кучерков С.Г., Унтилов А.А. Шадрин Ю.В., Шалобаев Е.В. Использование мехатронного подхода при анализе систем компьютерного проектирования микромеханических гироскопов. // Мехатроника, автоматизация, управление. 2004.. №2. С.31–37.

МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ ОРИЕНТАЦИИ В СРЕДЕ ГСНС

В.В.Серегин, В.И. Ющенко

Обобщаются результаты исследований проблемы определения ориентации подвижного объекта по информации от спутниковых навигационных систем, опубликованные в периодической печати. Сравняются результаты использования фазовых и частотных измерений. Даются рекомендации по их совместной обработке с целью повышения эффективности получаемой информации.

Введение

Современное направление развития систем ориентации и навигации можно характеризовать все более проникающим объединением инерциальных методов и технологий навигационных спутников. В области инерциальных чувствительных элементов устойчивая тенденция состоит в использовании малогабаритных, сравнительно дешевых измерителей [1]. Такие элементы, как известно, относятся к среднему, а чаще низкому классу точности. Построение систем ориентации и навигации с применением таких инерциальных измерительных модулей возможно [2] только на основе комплексирования вырабатываемой ими информации с информацией от других типов измерителей. В настоящее время основным и наиболее точным источником такой информации признаны глобальные спутниковые навигационные системы (ГСНС) типа GPS и ГЛОНАСС.

Традиционным можно считать использование информации о координатах объекта, полученной от ГСНС, при комплексной обработке навигационной информации. В современных интегрированных инерциально-спутниковых системах навигации в алгоритмы обработки также вводят информацию о скорости объекта, вычисленной в аппаратуре потребителя ГСНС. В журнальных статьях и в материалах научных конференций эти проблемы освещены достаточно подробно, (см., например.[3]). В аппаратуре потребителя ГСНС географические координаты и составляющие скорости объекта вычисляются путем обработки кодовых сигналов, принимаемых от навигационных спутников.

Однако в связи с повышением качества работы ГСНС и совершенствованием аппаратуры потребителя появилась возможность получать дополнительную информацию за счет обработки несущей частоты сигналов. В частности, измерение фазы несущей частоты позволяет существенно повысить точность измерения псевдодальностей и, как следствие, вычисленных координат. Качественно новым направлением использования информации, содержащейся в несущей частоте, является определение ориентации объекта [4, 5]. При включении этой информации в алгоритм начальной выставки инерциальной навигационной системы (ИНС) возможно существенное уменьшение времени готовности системы, особенно на подвижном объекте. Кроме того, появляется возможность непрерывной калибровки инерциальных измерительных модулей в реальных условиях. Особенно актуально комплексирование этих данных об ориентации объекта для решения задачи курсоуказания в системах, в которых не может быть реализован режим гирокомпасирования из-за низкой точности инерциальных чувствительных элементов.

В настоящее время уже имеются опытные разработки интегрированных систем, в которых используется информация об угловом положении объекта, полученная от много антенной аппаратуры потребителя ГСНС [3]. Проведенные испытания показали перспективность положенных в их основу решений. Однако теоретические основы определения ориентации объекта по информации, содержащейся в несущей частоте, проработаны недостаточно полно и не позволяют эффективно использовать ее, особенно на

объектах с высокой динамикой угловых движений. Поэтому необходимо обобщить уже имеющиеся результаты исследований этой проблемы, наметить перспективные направления развития и дать рекомендации по наиболее эффективному комплексированию различных видов информации об угловом движении объекта.

Информационная среда

Основными параметрами несущей частоты сигналов, принимаемых от навигационных спутников, являются частота и фаза колебаний. При этом частота отличается от известной частоты излучаемого сигнала на величину доплеровского сдвига, обусловленного относительным перемещением объекта и спутника. Фаза колебаний определяется псевдодальностью между ними. Эти параметры и определяют информационную среду, в которой решается задача определения ориентации объекта.

Суть интерферометрического принципа, реализуемого при использовании фазы несущей частоты, состоит в измерении разности фаз сигналов, принимаемых от спутника на разнесенные антенны (см. рис.1). В дальнейшем для краткости будем называть это **фазовым методом**.

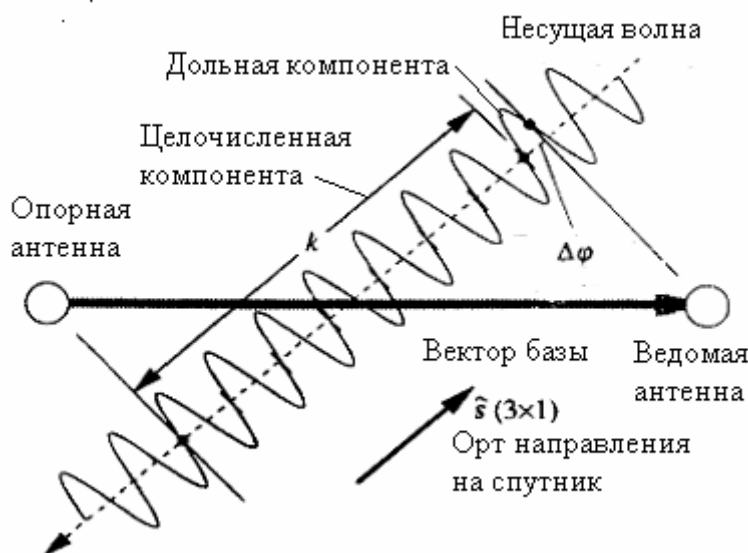


Рис. 1. Фазовый метод

Из рис.1 видно, что полная разность фаз сигналов, принимаемых опорной и ведомой антеннами, может быть представлена в виде

$$\varphi_{ij} = \Delta\varphi_{ij} + \lambda \cdot k_{ij} + \varepsilon_{ij}, \quad i = 1 \dots m, j = 1 \dots n, \quad (1)$$

где $\Delta\varphi_{ij}$ – дольная часть длины волны, λ – длина несущей волны, k_{ij} – целое число волн, ε_{ij} – ошибка измерения, i – номер вектора базы, j – номер навигационного спутника. В единицах длины эта разность фаз может быть выражена также через модуль вектора базы \bar{b}^i

$$\varphi_{ij} = |\bar{b}^i| \cdot \cos \beta_{ij}, \quad (2)$$

где β_{ij} – угол между i -м вектором базы и ортом направления от антенны на j -ый спутник. Из сравнения (1) и (2) вытекает, что по величине разности фаз φ_{ij} можно вычислить ориентацию вектора базы в плоскости, проходящей через базу антенн и местоположение спутника, относительно орта \bar{s}^j . Проблема состоит в том, что непосредственно может быть измерена только дольная часть фазы. Присутствие в (1) целого числа

длин волн приводит к неоднозначности фазовых измерений, разрешение которой представляет сложную самостоятельную задачу. В литературе, например, в [6], предложены различные методы исключения этой неоднозначности, и здесь они рассматриваться не будут.

Как отмечено выше, вторым информационным параметром является доплеровский сдвиг частоты. Результаты измерения разности частот сигналов, принимаемых опорной и ведомой антеннами (см. рис. 2), дают разность доплеровских сдвигов частот в каждой антенне и могут быть использованы для решения задачи ориентации. Будем называть этот подход **частотным методом**.

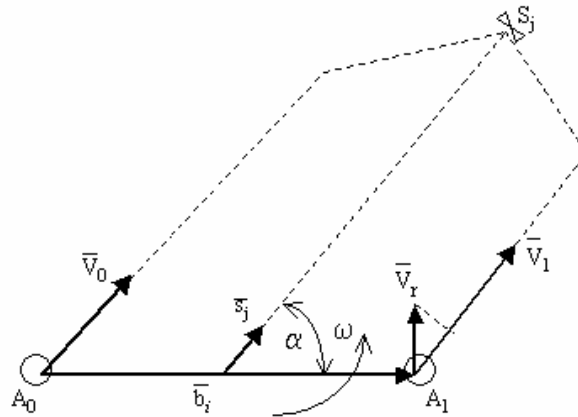


Рис. 2. Частотный метод

На рис.2 изображена плоскость, проходящая через вектор базы \bar{b}^i и навигационный спутник S_j , и приняты обозначения: A_0, A_1 – опорная и ведомая антенны соответственно, \bar{V}_0, \bar{V}_1 – скорости относительного движения фазовых центров антенн (ФЦА) и спутника, ω – скорость поворота ведомой антенны относительно опорной из-за углового движения объекта, \bar{V}_r – линейная скорость ФЦА антенны A_1 , обусловленная этим движением, \bar{s}^j – орт направления из центра базы антенн на спутник.

В [7] получено соотношение для разности доплеровских частот F_1 и F_0 , принимаемых антеннами A_1 и A_0 , в виде

$$F_{ij}^r = F_1 - F_0 = f_s \frac{\bar{V}_r^i \cdot \bar{s}^j}{c} = \frac{|\bar{\omega}_{ij} \times \bar{b}^i|}{\lambda} \sin \alpha_{ij}, \quad (3)$$

где f_s, λ – частота и длина волны сигнала, излучаемого навигационным спутником, $\bar{\omega}_{ij}$ – проекция вектора угловой скорости объекта на нормаль к плоскости, содержащей вектора \bar{b}^i и \bar{s}^j , c – скорость распространения электромагнитных колебаний. Непосредственно из (3) видно, что, измерив разность частот F_{ij}^r , можно вычислить угловое положение вектора базы относительно орта направления на данный навигационный спутник. При наличии избыточной информации, получаемой от нескольких спутников, по разности доплеровских частот можно вычислить, кроме угла, также угловую скорость объекта. Ограничением на применение частотного метода является требование, чтобы угловая скорость объекта была отлична от нулевого значения.

Определение ориентации

В задачах управления и/или стабилизации объекта его ориентация определяется относительно некоторой базовой системы координат (СК), в качестве которой часто

используется географическая СК NHE : ось N направлена по полуденной линии на север, ось H совпадает с внешней нормалью к поверхности референц-эллипсоида. Ориентация объекта задается взаимным расположением базовой СК и связанной СК XYZ : ось X – по продольной оси объекта, ось Z – по нормали к продольной оси вверх. Начала этих СК можно совместить, например, с фазовым центром опорной антенны, что не снижает общности решения задачи.

После решения в аппаратуре потребителя ГСНС основной навигационной задачи по определению координат объекта, используя также известные координаты данного спутника, можно вычислить направляющие косинусы (составляющие) орта \bar{s}^j в базовой СК. Отметим, что важным методологическим фактором в данном случае является возможность определить проекции орта на оси базовой СК без привлечения дополнительной внешней информации, а используя только информацию, полученную в среде ГСНС. Очевидно, что для того, чтобы найти величины проекций вектора базы \bar{b}^i на оси базовой СК, необходимо располагать его ориентацией относительно направлений на два навигационных спутника и иметь априори известную длину базы антенн, а именно:

$$\begin{aligned}\bar{b}^i \cdot \bar{s}^j &= b_N^i \cdot s_N^j + b_H^i \cdot s_H^j + b_E^i \cdot s_E^j; \\ \bar{b}^i \cdot \bar{s}^{j+1} &= b_N^i \cdot s_N^{j+1} + b_H^i \cdot s_H^{j+1} + b_E^i \cdot s_E^{j+1}; \\ \bar{b}^i \cdot \bar{b}^i &= (b_N^i)^2 + (b_H^i)^2 + (b_E^i)^2,\end{aligned}\tag{4}$$

где b_B^i ($B=N,H,E$) – проекции вектора \bar{b}^i на оси географической СК; s_B^j, s_B^{j+1} ($B=N,H,E$) – направляющие косинусы соответствующих ортов на те же оси. В том случае, когда можно одновременно наблюдать три навигационных спутника (минимальное число в созвездии, необходимое для решения основной задачи навигации), вместо (4) имеем матричное уравнение

$$\begin{aligned}\left\| \begin{array}{l} \bar{b}^i \cdot \bar{s}^j \\ \bar{b}^i \cdot \bar{s}^{j+1} \\ \bar{b}^i \cdot \bar{s}^{j+2} \end{array} \right\| &= \left\| \begin{array}{ccc} s_N^j & s_H^j & s_E^j \\ s_N^{j+1} & s_H^{j+1} & s_E^{j+1} \\ s_N^{j+2} & s_H^{j+2} & s_E^{j+2} \end{array} \right\| \cdot \left\| \begin{array}{l} b_N^i \\ b_H^i \\ b_E^i \end{array} \right\|.\end{aligned}\tag{5}$$

Компоненты b_C^i ($C=X,Y,Z$) векторов баз в связанной СК можно считать точно известными. Поэтому после определения компонент b_B^i ($B=N,H,E$) в географической СК задача ориентации решается на основе **метода векторного согласования** [8]. Суть метода состоит в том, что компоненты вектора \bar{b} , известные или измеренные в двух различных СК, связаны между собой через матрицу преобразования от одной СК к другой. В данном случае имеем

$$\left\| \begin{array}{l} b_X^i \\ b_Y^i \\ b_Z^i \end{array} \right\|^T = A_{CB} \cdot \left\| \begin{array}{l} b_N^i \\ b_H^i \\ b_E^i \end{array} \right\|^T,\tag{6}$$

где A_{CB} – матрица перехода от географической СК к связанной. Если матрица A_{CB} параметризована с помощью углов курса K и качки ϑ, γ , то эти углы вычисляются непосредственно по элементам матрицы. Следует иметь в виду, что для однозначного определения матрицы A_{CB} из (6) необходимо располагать как минимум двумя неколлинеарными векторами. При решении задачи ориентации объекта – это два вектора баз антенн, развернутые друг относительно друга на некоторый угол.

В [7] приведены результаты исследований, согласно которым измерения доплеровского сдвига частот несущего сигнала позволяют определять как углы ориентации, так и угловые скорости объекта. Для этого достаточно **методом наименьших квадратов** (МНК) решить векторно-матричное уравнение, составленное для трехбазовой антенной системы,

$$\|\Delta\omega\| + \|\omega\| \cdot \|(\Delta A_{CB})^T \cdot A_{CB}\| = \|\bar{V}_r^{-1} \quad \bar{V}_r^{-2} \quad \bar{V}_r^{-3}\| \cdot \|\bar{b}^1 \quad \bar{b}^2 \quad \bar{b}^3\|^{-1} \cdot A_{CB} - \|\omega\|, \quad (7)$$

где $\|\omega\|$ – кососимметрическая матрица из составляющих вектора $\bar{\omega}$ в географической СК, $\Delta\omega, \Delta A_{CB}$ – приращения элементов вычисляемых матриц. Система 9 скалярных уравнений, полученных из (7), решается методом последовательных приближений.

В [9] было показано, что по результатам частотных измерений можно непосредственно вычислить компоненты векторов баз антенн в географической СК. Для этого необходимо решить матричное уравнение, полученное для трех ортогональных векторов баз, с учетом наличия в нем избыточной информации:

$$\begin{pmatrix} -\|b_B^1\| & \|\omega\| & 0 & 0 \\ -\|b_B^2\| & 0 & \|\omega\| & 0 \\ -\|b_B^3\| & 0 & 0 & \|\omega\| \\ 0 & (\bar{b}^2)^T & (\bar{b}^1)^T & 0 \\ 0 & (\bar{b}^3)^T & 0 & (\bar{b}^1)^T \\ 0 & 0 & (\bar{b}^3)^T & (\bar{b}^2)^T \\ 0 & (\bar{b}^1)^T & 0 & 0 \\ 0 & 0 & (\bar{b}^2)^T & 0 \\ 0 & 0 & 0 & (\bar{b}^3)^T \\ 0 & (\bar{d}^1)^T & (\bar{d}^2)^T & (\bar{d}^3)^T \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \|\Delta\bar{\omega}\| \\ \|\Delta\bar{b}^1\| \\ \|\Delta\bar{b}^2\| \\ \|\Delta\bar{b}^3\| \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \bar{V}_r^{-1} - \bar{\omega} \times \bar{b}^1 \\ \bar{V}_r^{-2} - \bar{\omega} \times \bar{b}^2 \\ \bar{V}_r^{-3} - \bar{\omega} \times \bar{b}^3 \\ C_{12} - (\bar{b}^1)^T \cdot \bar{b}^2 \\ C_{13} - (\bar{b}^1)^T \cdot \bar{b}^3 \\ C_{23} - (\bar{b}^2)^T \cdot \bar{b}^3 \\ C_{11} - (\bar{b}^1)^T \cdot \bar{b}^1 \\ C_{22} - (\bar{b}^2)^T \cdot \bar{b}^2 \\ C_{33} - (\bar{b}^3)^T \cdot \bar{b}^3 \\ C_{123} - (\bar{b}^1)^T \cdot (\bar{b}^2 \times \bar{b}^3) \end{pmatrix}, \quad (8)$$

где $\Delta\bar{b}^i$ ($i=1,2,3$), $\Delta\bar{\omega}$ – приращения вычисляемых элементов матрицы; C_{ij} ($i, j=1,2,3$) – константы, характеризующие вектора баз и их взаимное положение; \bar{d}^i ($i=1,2,3$) – векторы, взаимные к векторам баз антенн в их проекциях на оси географической СК. Далее, используя известные направляющие косинусы орта \bar{s}^j , можно пересчитать векторы баз на направление от объекта на спутник и выделить целое число длин волн, содержащееся в модуле вектора. Это дает возможность исключить неоднозначность фазовых измерений за одну измерительную эпоху, что имеет большое значение для определения ориентации объектов с высокой динамикой угловых движений.

Сравнение методов. Использование информации, полученной фазовым или частотным методом, для определения ориентации объекта имеет как преимущества, так и недостатки в сравнении друг с другом. Для наглядности эти свойства сведены в табл. 1. Из их анализа следует вывод, что наилучшие результаты будут при совместном использовании информации, полученной этими двумя методами.

Совместная обработка фазовых и частотных измерений. Каждый из методов преобразования информации несущей волны обладает как положительными качествами, так и отрицательными. Для повышения эффективности использования информации естественно применить процедуру их совместной обработки. Возможные варианты такой процедуры показаны на рис. 3 и 4. Различаются они, в основном, алгоритмом обработки результатов измерения доплеровских сдвигов частоты.

В первом из вариантов (см. рис.3) линейная скорость \bar{V}_r ведомой антенны, полученная путем обработки разностей доплеровских частот, используется для вычисления ориентации вектора базы относительно орта \bar{s}^j направления на данный спутник. Спроецировав вектор базы на орт, находим целое число длин волн, содержащееся в этой проекции. При этом для повышения точности вычислений можно применить какой-либо фильтр, выделяющий именно целое число k_{ij} . Это решает задачу исключения

неоднозначности фазовых измерений. Кроме того, доплеровские частоты, измеренные во всех антеннах, используются в алгоритме вычисления угловых скоростей объекта.

Характеристика	Метод фазовых измерений	Метод частотных измерений
1	2	3
Источник первичной информации	Разность фаз несущего сигнала НКА ведомой антенны относительно опорной	Разность доплеровских сдвигов частот несущего сигнала НКА, принятого ведомой и опорной антеннами
Вторичная информация	Угловое положение базы антенны относительно направления на НКА	Разность линейных скоростей ФЦА в проекциях на оси географической СК
Определяемые параметры	Угловая ориентация объекта в географической СК	Угловые скорости и углы, определяющие ориентацию объекта в географической СК
Причина получения неоднозначного решения	Неизвестное число целых длин волн в разности псевдодальностей антенн и НКА при единичном измерении	Сохранение ориентации вектора линейной скорости при одновременном изменении направления векторов базы и угловой скорости на противоположное
Влияние динамики углового движения объекта	Снижает точность определения ориентации, увеличивает время обработки информации	Повышает точность определения ориентации и угловых скоростей

Таблица 1. Сравнение методов определения ориентации объекта

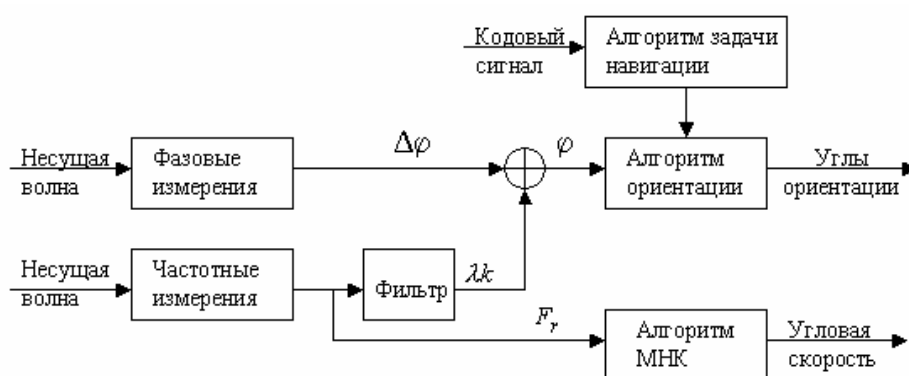


Рис. 3. Совместная обработка фазовых и частотных измерений. Вариант 1

В другом варианте (см. рис. 4) на основе уравнения (9) в географической СК вычисляются компоненты векторов баз всех антенн и угловые скорости объекта. Затем, как отмечалось выше, необходимо полученные компоненты каждого вектора базы спроецировать на орты направлений на соответствующие спутники и выделить в этих проекциях целое число длин волн. Далее задача определения углов ориентации решает-

ся так же, как в предыдущем случае. Можно предположить, что в данной процедуре вычисление компонент векторов баз будет выполнено с большей точностью за счет привлечения большего объема информации, поступающей от всего созвездия спутников, находящихся в зоне видимости объекта.

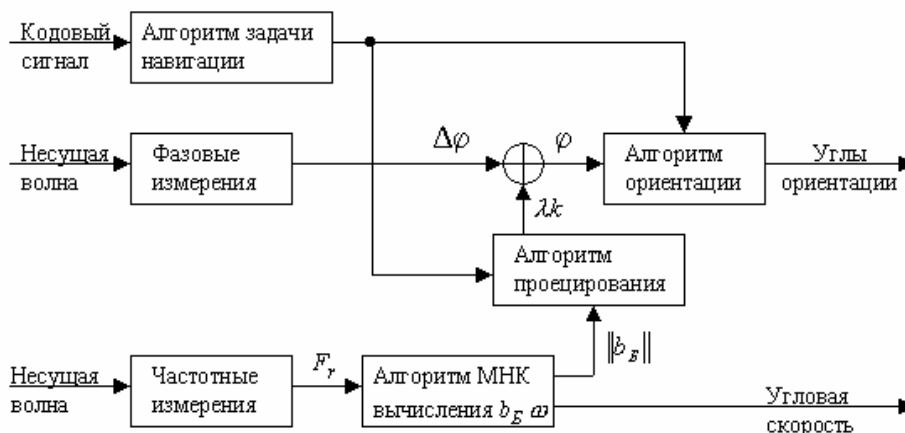


Рис. 4. Рис. 3. Совместная обработка фазовых и частотных измерений. Вариант 2

Заключение

Подводя итоги изложенного, можно сделать следующие выводы.

1. Информационная среда глобальных спутниковых навигационных систем ГЛОНАСС и NAVSTAR содержит координатно-временные, фазовые и частотные параметры необходимые и достаточные для автономного решения задачи определения движения объекта по углам и угловым скоростям.
2. Применение метода векторного согласования обеспечивает вычисление взаимной ориентации связанной и географической систем координат по минимальному составу рабочего созвездия навигационных спутников при наличии на объекте много антенной аппаратуры потребителя, образующей систему из двух неколлинеарных векторов баз, при условии априорно известных длинах баз и ориентации векторов относительно связанной системы координат.
3. Комплексная обработка фазовой и частотной информации, содержащейся в несущих колебаниях, дает возможность оптимизировать определение углов и угловых скоростей для подвижных объектов без ограничений на динамику их углового движения. Разработка оптимальной процедуры требует дальнейших исследований характеристик погрешностей обрабатываемой информации.

Литература

1. Ландау Б.Е. Современные тенденции развития чувствительных элементов инерциальных навигационных систем. // Навигация и управление движением. Сб. докладов I НТК молодых ученых. СПб.: ЦНИИ «Электроприбор», 1999. С. 87–97.
2. Пешехонов В.Г. Проблемы и перспективы современной гироскопии. // Изв. вузов. Приборостроение. 2000. Т. 43. № 1-2. С. 48–56.
3. Интегрированные инерциально-спутниковые системы навигации. Сб. статей и докладов./Под общей ред. акад.РАН В.Г.Пешехонова. СПб.: ГНЦ РФ-ЦНИИ «Электроприбор», 2001. 234 с.

4. Использование системы NAVSTAR для определения угловой ориентации объектов./ В.Н. Абросимов, В.И. Алексеева, Ю.А. Гребенко и др. // Зарубежная радиоэлектроника. 1989. № 1. С. 46-53.
5. Lachapelle G. Attitude Determination. // AGARD Lecture Series 207 - NATO.1996.P.10.
6. Степанов О.А., Кошаев Д.А. Исследование методов решения задачи ориентации с использованием спутниковых систем // Гироскопия и навигация. 1999, № 2. С.30–55.
7. Серегин В.В., Ющенко В.И. Алгоритмы обработки информации, получаемой многоантенной аппаратурой потребителей GPS. // Гироскопия и навигация. 1999. №3. С. 93–100.
8. Липтон А. Выставка инерциальных систем на подвижном основании. М.: Наука, 1971. 167 с.
9. Серегин В.В., Ющенко В.И. Одновременное разрешение неоднозначности фазовых измерений при определении ориентации подвижного объекта. // Гироскопия и навигация. 2004. №4. С. 88.