01;12

Интерпретация измерений оптического акселерометра

© А.С. Девятисильный

Институт автоматики и процессов управления Дальневосточного отделения Российской академии наук,
690041 Владивосток, Россия
e-mail: devyatis@iacp.dvo.ru

(Поступило в Редакцию 10 февраля 2004 г.)

Представлена структура измерителей оптического акселерометра, принцип действия которого основан на эффекте релятивистского смещения частоты, и дана оценка функции прибора с позиций современной практики инерциальной навигации и на перспективу.

1. Как известно [1], абсолютное линейное ускорение представимо в виде $w = g + f$, где g — гравитационное ускорение, или ускорение свободного движения („падения"), или напряженность гравитационного поля; f — кажущееся ускорение или равнодействующая (удельная) сил негравитационной природы.

В современных инерциальных навигационных системах (ИНС) применяются два типа измерителей линейного ускорения: механические [1] и интерферометрические [2]; последние, хотя и считаются оптическими приборами, но функционально подобны первым, потому что они, как и механические, являются измерителями кажущегося ускорения (f), что обусловлено принципом из работы — воздействие инертной массы на материал оптического канала.

В настоящей статье, продолжающей тему интерпретации измерений [3], дается оценка функциональным свойствам в определенном смысле чисто оптического акселерометра как прибора, имеющего следующую схему. На конце A прямолинейного отрезка AB фиксированной длины L помещен оптический (частоты ν) излучатель. Кроме того, на обоих (A и B) концах отрезка AB помещены отражающие устройства, так что возможно многократное переотражение излучения, генерируемого в A. Прямой (AB) и обратный (BA) проходы излучения реализуются, вообще говоря, в разных оптических средах с коэффициентами преломления соответственно n_1 и n_2. N таких проходов излучения образуют цикл измерения, по завершению которого наблюдателю представляется измеренное на момент окончания цикла значение частоты ν_N.

Введем инерциальную систему отсчета K и приборную систему $\tilde{K}$ с началом o в середине отрезка AB, выполняющую прямолинейное движение с абсолютным ускорением w, коллинеарным отрезку AB. Дальнейшее должно оцениваться с точки зрения наблюдателя, находящегося в $\tilde{K}$.

2. Принимая во внимание аддитивный характер формирования ускоренного движения системы $\tilde{K}$, сначала рассмотрим ее движение при $f \equiv 0$ и $g = \text{const}$. Тогда, учитывая, что гравитационное поле присутствует как в K, так и в $\tilde{K}$, но, кроме того, в $\tilde{K}$ действует сила инерции J_g, так что $J_g + g = 0$ (известный феномен невесомости), можем утверждать об отсутствии каких-либо изменений в частоте излучения, измеряемой в $\tilde{K}$. Действительно, противное противоречило бы экспериментально подтверждаемому феномену гравитационного смещения частоты („красное смещение" [4,5]).

При движении $\tilde{K}$ с ускорением $w = g + f$ $(f \neq 0$, $g = \text{const})$ в $\tilde{K}$ действует не компенсируемая внешним гравитационным полем сила инерции $J_f = -f$, которая, согласно принципу эквивалентности [4], отождествима с напряженностью гравитационного поля, существующего только в $\tilde{K}$, что обусловливает возможность наблюдения соответствующего „гравитационного" смещения частоты непосредственно в $\tilde{K}$. Этим же (вместе с изложенным несколько выше) доказывается, что и прямой оптический метод, рассматриваемый здесь, обеспечивает (при $g = \text{const}$) измерение (в $\tilde{K}$) только кажущегося (f) ускорения.

3. При анализе ситуации в общем случае неоднородного гравитационного поля $(g \neq \text{const})$ обратимся к определению собственного времени в $\tilde{K}$, связанному с известной интерпретацией метрического тензора (для слабых полей [4,5]). Его (тензора) компоненту g_{00}, соответствующую времени в 4-пространстве (пространство–время), на концах отрезка AB в i-м оптическом канале $(i = 1,\ 2)$ можно представить следующим образом:

$$g_{00}^{j,i} = 1 + 2\varphi_j/c_i^2,\ i = 1, 2;\quad j = AB\ (\text{или}\ j = 1, 2), \quad (1)$$

где $c_i = c/n_i$; c — скорость света в вакууме; φ_j, $j = A, B$ — потенциалы сил на концах отрезка AB.

Значения φ_j, $j = A, B$, представим в виде сумм двух компонент, обусловленных силами гравитационной природы $(\varphi_{j,g})$ и силами инерции $(\varphi_{j,J})$, так что $\varphi_j = \varphi_{j,g} + \varphi_{j,J}$, $j = A, B$. Обозначим через $0x$ ось системы $\tilde{K}$, коллинеарную AB, и разложим парциальные потенциалы около точки o, т. е.

$$\varphi_{j,g} = \varphi_0 + (-1)^j \frac{\partial\varphi_g}{\partial x}\frac{L}{2} + \frac{1}{2}\frac{\partial^2\varphi_g}{\partial x^2}\left(\frac{L}{2}\right)^2 + (-1)^j \frac{1}{6}\frac{\partial^3\varphi_g}{\partial x^3}\left(\frac{L}{2}\right)^3 + \dots,$$

$$\varphi_{j,J} = (-1)^j f\frac{L}{2} + (-1)^{(j-1)}\frac{\partial\varphi_g}{\partial x}\frac{L}{2};$$

$$j = 1, 2\ \ (\text{или}\quad j = A, B), \quad (2)$$

где через φ_g обозначен гравитационный потенциал, через φ_0 — его значение в точке o; в этой же точке берутся и значения всех частных производных.

С учетом связи $(d\tau^{j,i} = (g_{00}^{j,i})^{1/2}dt; \quad j = A, B; \ j = 1, 2)$ между собственным временем (τ) точек в $\tilde{K}$ и временем (t) в инерциальной системе K по окончании цикла измерения измеряемое значение частоты примет вид

$$\nu_N = \nu[g_{00}^{B,1} g_{00}^{A,2}/(g_{00}^{A,1} g_{00}^{B,2})]^{N/2} \approx \nu + \delta\nu_N,$$

где величина „красного" (или, может быть, „синего") смещения $\delta\nu_N$ является информационной компонентой измерения и с учетом (2) выражается следующим образом:

$$\delta\nu_N = \frac{\nu N(n_1^2 - n_2^2)}{c^2}(fL + \Delta),$$

$$\Delta = -\sum_{n=1}^{\infty} \frac{2}{(2n-1)!} \frac{\partial^{2n-1}\varphi_g}{\partial x^{2n-1}} \left(\frac{L}{2}\right)^{2n-1}. \qquad (3)$$

Из (3) находим

$$f + \Delta/L = c^2(\nu_N - \nu)/\big(\nu N L(n_1^2 - n_2^2)\big). \qquad (4)$$

Достаточные представления о порядке величин, входящих в (3) и (4), и о требуемой точности измерений с очевидностью следуют из примера: отождествим φ_g с внешним гравитационным потенциалом Земли, полагая его центральным, и будем рассматривать движение вдоль центральной прямой; тогда $\Delta L \approx gL^2/8r^2$ (r — расстояние до центра Земли); пусть далее $L = 1m$, $n_1 = 1$, $n_2 = 2$, $\nu = 3 \cdot 10^{14}$ Hz, $N = 10^8$, $f \in [10^{-4}; 10]m/s^2$, $r = 6.4 \cdot 10^6 m$; тогда $\delta\nu_N \in [1; 10]$ Hz; $\Delta/L \approx 3 \cdot 10^{-14}$ m/s^2.

Как видим из примера, присутствие в (4) величины Δ/L, содержащей информацию о гравитационном поле, предъявляет повышенные требования к точности измерений. Отметим также, что рассматриваемый оптический акселерометр может быть использован и в качестве гравиметра; при этом удельная сила реакции опоры, на которой прибор установлен, равная по величине местной напряженности гравитационного поля, будет играть роль удельной силы негравитационной природы, т. е. f.

4. Таким образом, показано, что измерения оптических акселерометров, принцип действия которых основан на использовании эффекта релятивистского смещения частоты, содержит информацию как о кажущемся ускорении (f), так и о гравитационном поле (Δ). В случае поля со слабой неоднородностью, каковым является, например, внешнее гравитационное поле Земли, эти приборы, если смотреть с существующих позиций технологии измерений и практики инерциальной навигации, можно считать измерителями кажущегося ускорения, т. е. функционально подобными применяемым в настоящее время механическим и интерферометрическим акселерометрам.

Вместе с тем прогресс технологий измерений до уровня, обеспечивающего измерение микроускорений порядка $(10^{-14}$–$10^{-16})$ m/s^2, существенно повысит информационную значимость обеих компонент измерения, что в свою очередь окажет значительное влияние на развитие метода инерциальной навигации [6].

Список литературы

[1] *Ишлинский А.Ю.* Классическая механика и силы инерции. М.: Наука, 1987. 320 с.

[2] *Бусурин В.И., Носов Ю.Р.* Волоконно-оптические датчики: физические основы, вопросы расчета и применения. М.: Энергоатомиздат, 1990. 256 с.

[3] *Девятисильный А.С.* // ЖТФ. 2003. Т. 73. Вып. 9. С. 130–131.

[4] *Паули В.* Теория относительности. Пер. с англ. под ред. В.Л. Гинзбурга и В.П. Фролова. М.: Наука, 1991. 328 с.

[5] *Бёрке У.* Пространство-время, геометрия, космология. Пер. с англ. под ред. Д.В. Гальцова. М.: Мир, 1985. 416 с.

[6] *Девятисильный А.С.* // ЖТФ. 2004. Т. 74. Вып. 5. С. 134–135.