

НАВИГАЦИЯ

УДК 681.586.2

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ МАГНИТНОГО ПОЛЯ СУДНА

В. В. МЕЛЕШКО

(НТУУ «КПИ», г. Киев, Украина)

Рассмотрен способ определения параметров намагниченности морского объекта в реальных условиях плавания, позволяющий отказаться от традиционных методик уничтожения широтной девиации.

Магнитное поле в конкретной точке объекта описывают уравнениями Пуассона [1]:

$$\begin{aligned} X' &= X + aX + bY + cZ + P; \\ Y' &= Y + dX + eY + fZ + Q; \\ Z' &= Z + gX + hY + kZ + R; \end{aligned} \quad (1)$$

где X', Y', Z' – проекции вектора напряженности (или индукции) \vec{T}' суммарного магнитного поля на оси, связанные с объектом;

X, Y, Z – составляющие вектора напряженности \vec{T} магнитного поля Земли (МПЗ).

Входящие в эти уравнения коэффициенты a, b, c, \dots, k называют параметрами Пуассона. Они характеризуют влияние магнитомягкого железа. Слагаемые P, Q, R выражают проекции напряженности магнитотвердого железа. Величины P, Q, R остаются практически неизменными. Параметры Пуассона незначительно зависят от широты места. Назовем совокупность параметров Пуассона и слагаемых P, Q, R параметрами *поля ферромагнитного объекта (ПФО)*.

Для вычисления магнитной девиации магнитного компаса на флоте и в авиации применяют формулу:

$$\delta = A + B \sin \psi_k + C \cos \psi_k + D \sin 2 \psi_k + E \cos 2 \psi_k, \quad (2)$$

где A, B, C, D, E – коэффициенты девиации.

Между параметрами ПФО и коэффициентами девиации существуют приближенные зависимости, которые можно использовать при горизонтальном положении объекта:

$$A = \frac{d-b}{2\lambda}, B = \frac{cZ+P}{\lambda H}, C = \frac{fZ+Q}{\lambda H}, D = \frac{a-e}{2\lambda}, E = \frac{d+b}{2\lambda}, \lambda = 1 + \frac{a+e}{2}, \quad (3)$$

Составляющую, описываемую коэффициентом A , называют круговой девиацией, она неизменна при любом курсе объекта. Коэффициенты B и C характеризуют полукруговую девиацию; она изменяется от нуля до максимума за поворот объекта (полкруга). Обычно полукруговые девиации являются определяющими на объекте.

Коэффициенты D и E характеризуют четвертную девиацию, которая изменяется от нуля до максимума за четверть круга.

Как видно из выражений (3), полукруговая девиация зависит от магнитотвердого железа (коэффициентов P и Q), магнитомягкого железа, состояние которого зависит от МПЗ (вертикальной составляющей Z и горизонтальной составляющей H). Поскольку Z и H изменяются в зависимости от координат места, то и полукруговая девиация изменяет свою величину с изменением координат места. В условиях малого волнения (1–2 балла), при которых производится измерение остаточной девиации, коэффициенты (3) достаточно хорошо совпадают с вычисленными по результатам измерений.

Как показывают проведенные исследования, в условиях качки объекта формула (2) с коэффициентами (3) дает весьма приближенную оценку девиации (рис. 3).

Уничтожение девиации судна по традиционным методикам требует больших затрат времени, исчисляемых часами [1], и значительных энергозатрат для обеспечения маневров судна.

Более точную оценку влияния магнитных полей-помех, а значит, и уничтожения этого влияния (т. е. девиации) можно выполнить по параметрам ПФО. Примеры такой оценки можно найти в работе [2].

Для их определения можно предложить следующую методику.

Представим модель (1) в векторно-матричной форме. Для этого введем следующие векторы и матрицы:

$$\mathbf{T}' = \begin{bmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{bmatrix}, \quad \mathbf{F} = \begin{bmatrix} a & b & c \\ d & e & f \\ g & h & k \end{bmatrix}, \quad \mathbf{T} = \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}, \quad \mathbf{M} = \begin{bmatrix} P \\ Q \\ R \end{bmatrix}; \quad \mathbf{T}_g = \begin{bmatrix} 0 \\ H \\ -Z_g \end{bmatrix}.$$

Здесь \mathbf{T}' – вектор суммы магнитного поля Земли и объекта в его заданной точке, \mathbf{F} – матрица параметров магнитомягкого железа, \mathbf{T} – вектор магнитной индукции МПЗ в проекциях на оси объекта $Ox_c y_c z_c$ (рис. 1), \mathbf{M} – вектор индукции магнито-твердого железа, \mathbf{T}_g – вектор составляющих (горизонтальной H и вертикальной $-Z_g$) МПЗ в проекциях на оси сопровождающего базиса $O\xi_M \eta_M \zeta$.

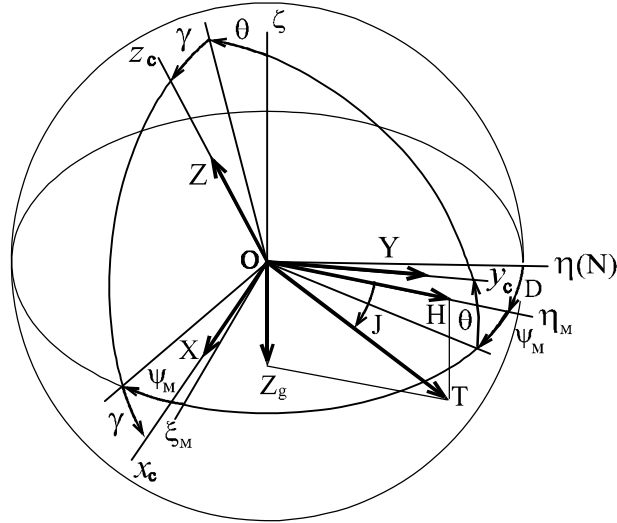


Рис. 1. Углы и системы координат

Вектор \mathbf{T} связан с вектором \mathbf{T}_g соотношением $\mathbf{T} = C^{bg} \mathbf{T}_g$, где C^{bg} – матрица направляющих косинусов между сопровождающим и связанным базисами, взаимное положение которых задано углами магнитного курса ψ_m , дифферента θ и крена γ :

C^{bg}	ξ_m	η_m	ζ
x_c	$\cos \gamma \cos \psi_m + \sin \gamma \sin \theta \sin \psi_m$	$-\cos \gamma \sin \psi_m + \sin \gamma \sin \theta \cos \psi_m$	$-\sin \gamma \cos \theta$
y_c	$\cos \theta \sin \psi_m$	$\cos \theta \cos \psi_m$	$\sin \theta$
z_c	$\sin \gamma \cos \psi_m - \cos \gamma \sin \theta \sin \psi_m$	$-\sin \gamma \sin \psi_m - \cos \gamma \sin \theta \cos \psi_m$	$\cos \gamma \cos \theta$

(4)

Компоненты вектора \mathbf{T} в результате имеют вид:

$$X = H(\cos \psi_m \sin \theta \sin \gamma + \sin \psi_m \cos \gamma) + Z_g \cos \theta \sin \gamma,$$

$$Y = H \cos \psi_m \cos \theta - Z_g \sin \theta,$$

$$Z = -H(-\sin \psi_m \sin \gamma + \cos \psi_m \cos \gamma \sin \theta) - Z_g \cos \theta \cos \gamma.$$

Магнитный курс связан с истинным курсом ψ соотношением $\psi_m = \psi - D$, где D – магнитное склонение. Таким образом, выражения (1) можно записать в виде:

$$\mathbf{T}' = (\mathbf{I} + \mathbf{F})\mathbf{C}\mathbf{T}_g + \mathbf{M} = \mathbf{C}\mathbf{T}_g + \mathbf{F}\mathbf{C}\mathbf{T}_g + \mathbf{M}, \quad (5)$$

Составляющие \mathbf{T}' измеряют трехосным магнитометром, вектор выходных сигналов которого обозначим $\tilde{\mathbf{T}}'$. Направляющие косинусы (4) определяют по

показаниям гирогоризонткомпаса с учетом магнитного склонения D , определяемого из карт или таблиц МПЗ. Составляющие МПЗ можно легко определить, например, с помощью калькулятора *National Geophysical Data Centre*. Для этого необходима информация о координатах объекта, которая может быть получена от спутникового приемника. В результате от (5) перейдем к соотношению:

$$\tilde{\mathbf{T}}' - \tilde{\mathbf{C}}\tilde{\mathbf{T}}'_g = \mathbf{F}\mathbf{C}\mathbf{T}'_g + \mathbf{M} = \mathbf{F}\mathbf{T}' + \mathbf{M}. \quad (6)$$

Волной в этом выражении отмечены измеренные или вычисленные значения. Таким образом, получим разность:

$$\Delta = \tilde{\mathbf{T}}' - \tilde{\mathbf{C}}\tilde{\mathbf{T}}'_g.$$

При движении объекта в процессе качки или циркуляции снимаем ряд значений

$$\Delta_i = \mathbf{F}\mathbf{C}_i\mathbf{T}'_g + \mathbf{M} = \mathbf{F}\mathbf{T}'_i + \mathbf{M}, \quad (7)$$

где i – номер измерения. Представим вектор разностей $\Delta = [\Delta X \quad \Delta Y \quad \Delta Z]^T$.

Запишем выражение (7) в развернутом виде:

$$\begin{bmatrix} \Delta X_i \\ \Delta Y_i \\ \Delta Z_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a & b & c \\ d & e & f \\ g & h & k \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X_i \\ Y_i \\ Z_i \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} P \\ Q \\ R \end{bmatrix}.$$

Преобразуем его к виду:

$$\begin{bmatrix} \Delta X_i \\ \Delta Y_i \\ \Delta Z_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a & b & c & P \\ d & e & f & Q \\ g & h & k & R \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X_i \\ Y_i \\ Z_i \\ 1 \end{bmatrix}.$$

При количестве измерений $i=1 \dots n$

$$\begin{bmatrix} \Delta X_1 \dots \Delta X_n \\ \Delta Y_1 \dots \Delta Y_n \\ \Delta Z_1 \dots \Delta Z_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a & b & c & P \\ d & e & f & Q \\ g & h & k & R \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X_1 \dots X_n \\ Y_1 \dots Y_n \\ Z_1 \dots Z_n \\ 1 \dots 1 \end{bmatrix}. \quad (8)$$

Введем обозначения матриц:

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} \Delta X_1 \dots \Delta X_n \\ \Delta Y_1 \dots \Delta Y_n \\ \Delta Z_1 \dots \Delta Z_n \end{bmatrix}, \quad \mathbf{S} = \begin{bmatrix} a & b & c & P \\ d & e & f & Q \\ g & h & k & R \end{bmatrix}, \quad \mathbf{A} = \begin{bmatrix} X_i \dots X_n \\ Y_i \dots Y_n \\ Z_i \dots Z_n \\ 1 \dots 1 \end{bmatrix}.$$

Тогда (8) можно представить в компактном виде

$$\mathbf{B} = \mathbf{S} \cdot \mathbf{A}$$

Вспользуемся методом наименьших квадратов (МНК) в пакетной форме [3]

$$\hat{\mathbf{S}} = \mathbf{B} \cdot \mathbf{A}^+ = \mathbf{B} \cdot \mathbf{A}^m \cdot (\mathbf{A} \cdot \mathbf{A}^m)^{-1},$$

где матрица $\mathbf{A}^+ = \mathbf{A}^m \cdot (\mathbf{A} \cdot \mathbf{A}^m)^{-1}$ называется псевдообратной, или в другой форме [4]:

$$\hat{\mathbf{S}}^T = (\mathbf{N}^T \mathbf{N})^{-1} \mathbf{N}^T \mathbf{B}^T,$$

где $\mathbf{N} = \mathbf{A}^T$.

В результате найдем оценки параметров ПФО $\hat{\mathbf{S}}$, соответствующие матрице параметров \mathbf{S} .

Рассмотрим возможности такого способа определения параметров ПФО, проведя моделирование.

В качестве характеристики эффективности оценки используем отношение оценки к заданному параметру для основных шести параметров (P, Q, R, a, e, k).

Моделирование показывает такие особенности способа.

Для полной оценки всех параметров движение корабля должно быть пространственным, т. е. качка должна быть как минимум двухосной, или же одноосную качку следует дополнить циркуляцией. Для выполнения оценки необходимы как минимум четыре шага измерений. Это объясняется тем, что для выражения (8) возможна декомпозиция на три векторных уравнения, в каждом из которых содержится четыре определяемых параметра (строки \mathbf{S}). Чем больше изменяется положение судна на шаге качки, тем лучше. Случайность качки способствует повышению качества оценки. Увеличение количества измерений способствует сглаживанию влияния случайных ошибок измерителей.

В заключение приведем результаты конкретного примера. На рис. 2 показаны графики изменения углов курса, крена и дифферента и параметры процесса: Ck, Ct, Cg – частоты качки, $Aksi, Atet, Agam$ – амплитуды качки, $omtc$ – угловая скорость циркуляции, $sigma$ – постоянные ошибки гирогоризонткомпаса, dt – шаг измерений во времени, dTm – случайная ошибка магнитометра, dTg – постоянная ошибка табличных данных о элементах МПЗ, sig_1 – случайная составляющая качки и, наконец, относительные показатели точности $oFo(j,k)$ оценки элементов $S(j,k)$ (1 соответствует безошибочной оценке). Полагаем, что завышение dTg [5] включает также возможные вариации геомагнитного поля. В приведенном примере ошибки

оценки находятся в пределах от 1 до 9%. Точность повышается при уменьшении систематических ошибок гиригоризонткомаса и карт МПЗ.

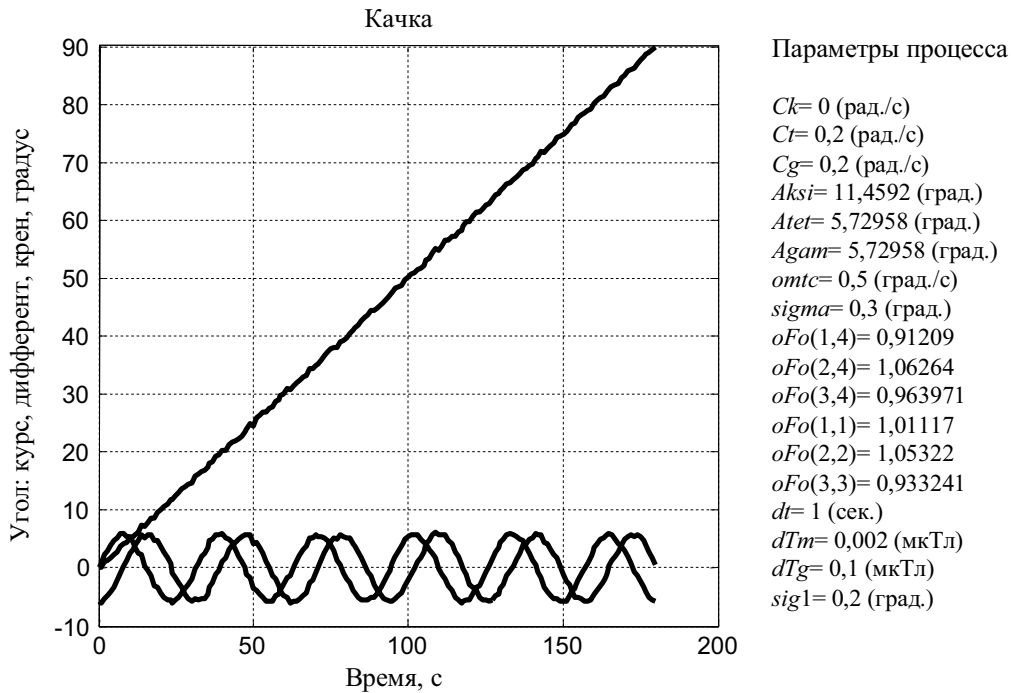


Рис. 2. Данные примера моделирования

Рассмотрим, как точно можно определить девиацию при таких оценках. Рассчитаем девиацию по формуле [6]

$$\delta = \psi_m - \arctg \frac{-(X' \cos \gamma + Z' \sin \gamma)}{(X' \sin \gamma - Z' \cos \gamma) \sin \theta + Y' \cos \theta} \quad (9)$$

Затем рассчитаем девиацию δ_1 по такой же формуле, где вместо составляющих магнитного поля объекта (1) используем составляющие с оценками параметров ПФО:

$$\begin{aligned} \hat{X}' &= X + \hat{a}X + \hat{b}Y + \hat{c}Z + \hat{P}, \\ \hat{Y}' &= Y + \hat{d}X + \hat{e}Y + \hat{f}Z + \hat{Q}, \\ \hat{Z}' &= Z + \hat{g}X + \hat{h}Y + \hat{k}Z + \hat{R}. \end{aligned}$$

В результате получим ошибку оценки девиации $\Delta_\delta = \delta - \delta_1$ (рис. 3).

На рис.3 показано также (средний график), что истинная девиация, вычисленная по точной формуле (9), может отличаться от девиации по приближенной формуле (2) при заданных углах крена и дифферента на единицы градусов.

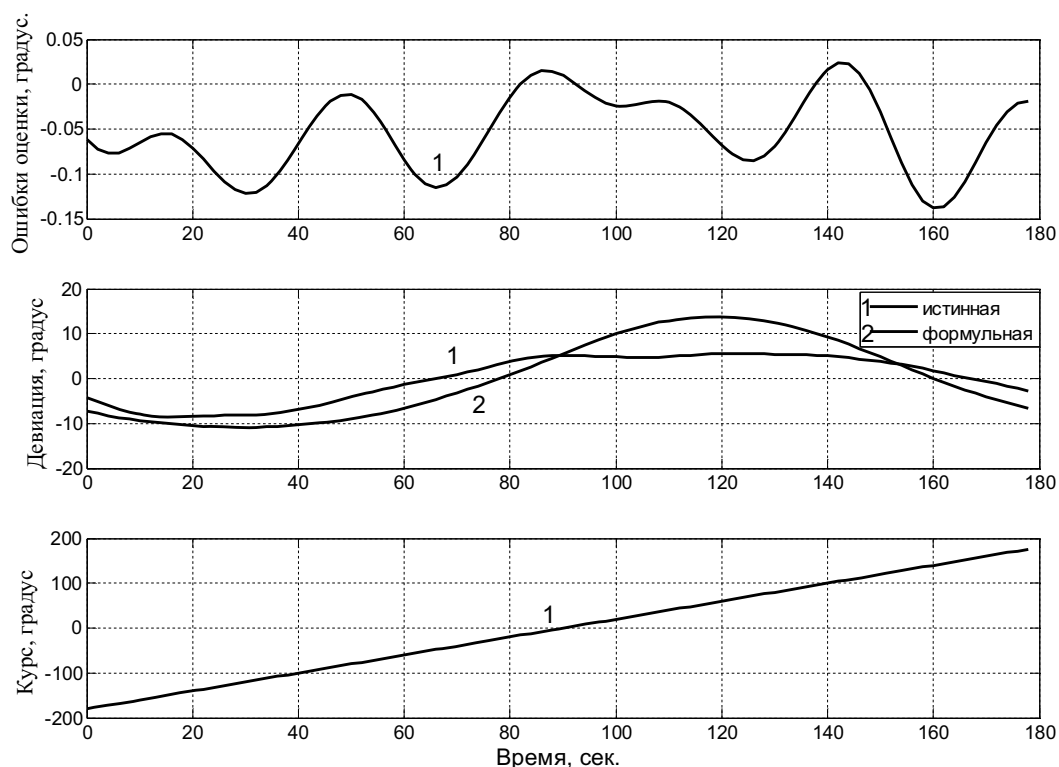


Рис. 3. Девияция и ошибка ее оценки

Выводы

Предложены алгоритм и методика определения параметров магнитного поля судна, позволяющие с достаточной точностью определить эти параметры за единицы секунд в условиях качающегося судна. Можно предположить, что оценка параметров в реальных условиях движения корабля учитывает также влияние магнитной вязкости магнитных материалов. Полученные оценки параметров позволят быстро и с высокой точностью компенсировать (уничтожить) девиацию. Наличие оценок параметров магнитного поля судна позволяет отказаться от традиционных методик уничтожения широтной девиации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Воронов В. В., Григорьев Н. Н., Яловенко А. В. Магнитные компасы. – СПб.: «Элмор», 2004. – 188 с.
2. Малеев П. И., Смирнов Б. М. Новые методы определения составляющих вектора магнитной индукции магнитного поля Земли с ферромагнитного объекта // Навигация и гидрография. – 1999. – №8. – С. 82–86.
3. Мелешко В. В., Нестеренко О. И. Бесплатформенные инерциальные навигационные системы. Учебное пособие. – Кировоград: ПОЛИМЕД – Сервис, 2011. – 172 с.
4. Сейдж С., Мелс Дж. Теория оценивания и её применение в связи и управлении. – М.: Связь, 1976. – 496 с.
5. Малеев П. И., Хребтов А. А., Шерemet В. И. Состояние развития и перспективы использования морской магнитометрической аппаратуры // Навигация и гидрография. – 2006. – №23. – С. 91–96.
6. Одинцов А. А., Мелешко В. В., Шаров С. А. Ориентация объектов в магнитном поле Земли. – Киев.: «Корнийчук», 2008. – 160 с.

DETERMINATION OF THE MAGNETIC FIELD PARAMETERS OF A VESSEL

V. V. Meleshko (The National Technical University of Ukraine “Kiev Polytechnical Institute”)

The method of determining the Poisson magnetic parameters describing the magnetic field-interference of a vessel is considered. The method enables the parameters to be determined during the vessel's movement under the roll and pitch conditions, using the data of three-axis magnetometer, gyrohorizon and parameters of the Earth magnetic field, determined by the chart. Having determined the parameters within short period of time (seconds) without numerous vessel's maneuvers, it is possible to compensate for deviation easily.