

Нелинейный компенсатор магнитных помех авиационной магнитометрической системы

И. Г. АНЦЕВ, В. В. АВЕРКИЕВ, Ю. М. ПЕТУХОВ

ОАО «НПП «Радар ммс», e-mail: averkiev_vv@radar-mms.com

Исследованы методические погрешности компенсатора магнитных помех, создаваемых носителем магнитометрической системы. Показано, что основной источник этих погрешностей — неучтенная нелинейная составляющая магнитного поля носителя в уравнении компенсатора. Разработан алгоритм нелинейной настройки компенсатора, обеспечивающий эффективное подавление этой составляющей по сравнению со стандартной линейной процедурой.

Ключевые слова: скалярный магнитометр, магнитные помехи носителя, нелинейный компенсатор.

Methodical errors are investigated for compensation of the magnetic noise produced by the carrier of an airborne magnetometer system. It is shown that the main source of those errors results from neglecting the non-linear part of the magnetic field of the carrier in the compensation equation. An algorithm has been developed for non-linear adjustment of the compensator that provides an effective noise suppression. This technique essentially surpasses the standard linear procedures.

Key words: scalar magnetometer, magnetic noise of the carrier, non-linear magnetic noise compensator.

Современные компенсаторы магнитных помех (КМП), создаваемых носителем авиационной магнитометрической системы скалярному магнитометру (СМ), строятся на основе модели

$$|\mathbf{B}_\Sigma| = |\mathbf{B}| (1 + \eta \mathbf{b}^T \mathbf{b}_c + O(\eta^2) + \dots), \quad (1)$$

где $|\mathbf{B}_\Sigma|$ — модуль вектора индукции магнитного поля (МП), действующего на измерительный преобразователь магнитометра; $\eta = |\mathbf{B}_c|/|\mathbf{B}|$ — малый параметр, по которому происходит разложение $|\mathbf{B}_\Sigma|$ в степенной ряд; $\mathbf{b}, \mathbf{b}_c$ — орты векторов индукции магнитных полей Земли $\mathbf{B}$ и носителя $\mathbf{B}_c$; $\mathbf{B}_c = \mathbf{P}_c + I_c \mathbf{B} + F_c \partial \mathbf{B} / \partial t$; $\mathbf{P}_c, I_c, F_c$ — вектор постоянного и тензоры индуктивного и вихревого намагничения для СМ; $O(\eta^2)$ — остаточный член разложения, пропорциональный η^2 .

Стандартное уравнение КМП опирается на линеаризованную форму этой модели $|\mathbf{B}_\Sigma|$, в которой неизмеряемые параметры орт $\mathbf{b}$ вектора $\mathbf{B}$ и его производная $\partial \mathbf{b} / \partial t$ заменены на измеряемые орт $\mathbf{u}$ вектора показаний $\mathbf{U}$ векторного магнитометра (ВМ) и его производную $\partial \mathbf{u} / \partial t$ [1—3]:

$$|\mathbf{B}_\Sigma|_\Gamma = |\mathbf{B}| + \mathbf{u}^T (\mathbf{P} + I \mathbf{u} + F \partial \mathbf{u} / \partial t), \quad (2)$$

где $\mathbf{P} = \mathbf{P}_c, I = |\mathbf{B}|/I_c, F = |\mathbf{B}|/F_c$.

Такая замена свидетельствует о том, что в модели (2) не учитывается влияние МП носителя на показания ВМ, другими словами, принимается, что $\mathbf{U} = \mathbf{B}$. В действительности $\mathbf{U} = \mathbf{B} + \mathbf{B}_b$, где $\mathbf{B}_b = \mathbf{P}_b + I_b \mathbf{B} + F_b \partial \mathbf{B} / \partial t$ — вектор индукции МП, создаваемого носителем в окрестности измерительного преобразователя ВМ; $\mathbf{P}_b, I_b, F_b$ — вектор постоянного и тензоры индуктивного и вихревого намагничения для ВМ.

Линеаризованная модель (2) представляет линейную форму относительно параметров $\mathbf{P}, I, F$, которые характеризуют МП носителя. Именно это обстоятельство позволяет просто и эффективно оценивать коэффициенты помех в процессе настройки КМП, а также вычислять сигнал помехи для произвольного курса движения носителя. Пренебрежение в (2) нелинейной составляющей не имеет последствий в случае размещения СМ на маломощных летательных аппаратах, однако при размещении СМ на магнитных носителях, в частности, вертолетах, это приводит к дополнительным, часто значительным погрешностям КМП.

Методические погрешности КМП обусловлены неучитываемой в (2) нелинейной составляющей модели (1). Представим эту модель в форме, в которую корректно введены показания ВМ, а также учтена нелинейная составляющая:

$$|\mathbf{B}_\Sigma|_{\text{нл}} = |\mathbf{B}_\Sigma|_\Gamma + O(\eta_{\text{эфф}}, \eta_b), \quad (3)$$

где

$$|\mathbf{B}_\Sigma|_\Gamma = |\mathbf{B}| + \mathbf{u}^T (\mathbf{P}_{\text{эфф}} + I_{\text{эфф}} \mathbf{u} + F_{\text{эфф}} \partial \mathbf{u} / \partial t) \quad (4)$$

представляет линеаризованную составляющую модели, а

$$O(\eta_{\text{эфф}}, \eta_b) = |\mathbf{B}| \left(\frac{1}{2} \eta_{\text{эфф}}^2 |\mathbf{b}_{\text{эфф}}^{\text{орт}}|^2 - \eta_{\text{эфф}} \eta_b \mathbf{b}_{\text{эфф}}^{\text{орт}T} \mathbf{b}_b^{\text{орт}} \right) \quad (5)$$

— квадратичную поправку; $\mathbf{P}_{\text{эфф}} = \mathbf{P}_c - I_c (E + I_b)^{-1} \mathbf{P}_b$; $I_{\text{эфф}} = I_c (E + I_b)^{-1}$; $F_{\text{эфф}} = F_c (E + I_b)^{-1}$; E — единичная матрица,

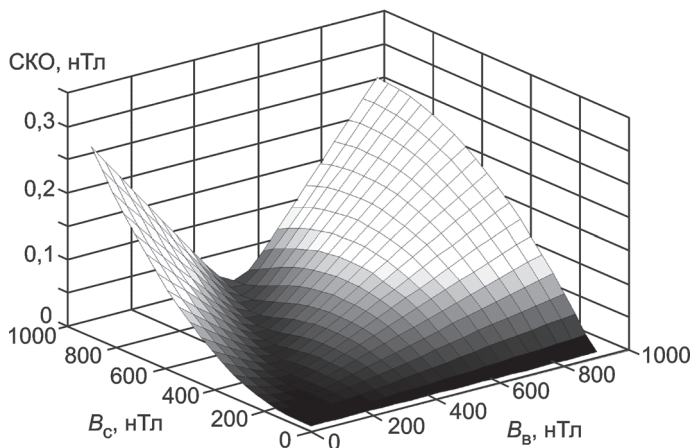


Рис. 1. Зависимость SKO погрешности настройки КМП от $|\mathbf{B}_c|$ и $|\mathbf{B}|$

$\eta_{\text{эфф}} = |\mathbf{B}_{\text{эфф}}|/|\mathbf{B}|$; $\eta_{\text{в}} = |\mathbf{B}_{\text{в}}|/|\mathbf{B}|$; $\mathbf{B}_{\text{эфф}} = \mathbf{P}_{\text{эфф}} + I_{\text{эфф}} \mathbf{U} + F_{\text{эфф}} \partial \mathbf{U} / \partial t$; $\mathbf{b}_{\text{эфф}}$, $\mathbf{b}_{\text{в}}$ — орты векторов $\mathbf{B}_{\text{эфф}}$, $\mathbf{B}_{\text{в}}$; индексом «орт» обозначены компоненты ортов $\mathbf{b}_{\text{эфф}}$ и $\mathbf{b}_{\text{в}}$, ортогональные вектору $\mathbf{B}$.

Обратим внимание, что в отличие от (2) линейризованная составляющая (4) определена не только ортом $\mathbf{u}$, но и полным вектором $\mathbf{U}$ показаний ВМ. При этом коэффициенты помех $\mathbf{P}_{\text{эфф}}$, $I_{\text{эфф}}$, $F_{\text{эфф}}$ зависят от параметров МП носителя, которое действует на измерительные преобразователи СМ и ВМ.

Соотношения (1) и (3) описывают один и тот же объект — сигнал СМ, заданный в разных представлениях. В первом случае (представление $\mathbf{B}$) сигнал СМ выражается через параметры магнитного поля, реально действующего на его измерительный преобразователь. Во втором случае (представление $\mathbf{U}$) сигнал СМ является собой искусственную конструкцию, в которой он выражается через показания ВМ. Потребность в представлении $\mathbf{U}$ очевидна: оно обеспечивает переход от неизмеряемых параметров к измеряемым параметрам — показаниям ВМ.

Из (3)–(5) можно сделать следующие выводы:

обе составляющие модели (3) зависят от параметров $\mathbf{B}_{\text{с}}$ и $\mathbf{B}_{\text{в}}$ МП носителя, действующего на измерительные преобразователи СМ и ВМ;

специальным подбором $\mathbf{B}_{\text{в}}$ можно свести к нулю нелинейную составляющую $O(\eta_{\text{эфф}}, \eta_{\text{в}})$ МП носителя в показаниях СМ, что является предпосылкой радикального улучшения качества компенсации магнитных помех с использованием линейризованного уравнения КМП. Из (5) следует условие, которое обеспечивает обнуление составляющей $O(\eta_{\text{эфф}}, \eta_{\text{в}})$

$$\mathbf{B}_{\text{в}}^{\text{орт}} = 0,5 \mathbf{B}_{\text{эфф}}^{\text{орт}}, \quad (6)$$

где $\mathbf{B}_{\text{эфф}}^{\text{орт}}$, $\mathbf{B}_{\text{в}}^{\text{орт}}$ — составляющие векторов $\mathbf{B}_{\text{эфф}}$ и $\mathbf{B}_{\text{в}}$, ортогональные вектору индукции $\mathbf{B}$ МП Земли.

Данные выводы были подтверждены в процессе имитационного математического моделирования настройки КМП. Напомним, что стандартная процедура его настройки включает сбор показаний СМ и ВМ при эволюциях носителя по

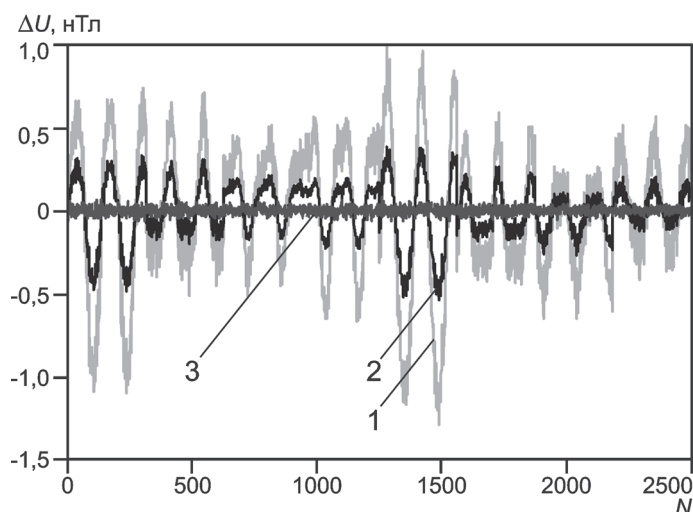


Рис. 2. Погрешности настройки КМП: 1 — $\Delta U_{\text{л}}$; 2 — $\Delta U_{\text{н}}$; 3 — $\Delta U_{\text{нл}}$

крену и тангажу на основных магнитных курсах $w = 0, \pi/2, \pi, 3\pi/2$ (движение носителя по “коробочке” [3]), а также формирование и решение переопределенной системы линейных уравнений, основанных на линейризованной модели (2):

$$U_{\text{СМ}}(t_k) = |\mathbf{B}_{\Sigma}|_{\text{л}}, \quad (7)$$

где $U_{\text{СМ}}(t_k)$ — показания СМ в момент времени t_k .

При моделировании показаний СМ и ВМ $U_{\text{СМ}} = |\mathbf{B} + \mathbf{B}_{\text{с}}| + \varepsilon_{\text{с}}$ и $\mathbf{U} = \mathbf{B} + \mathbf{B}_{\text{в}} + \varepsilon_{\text{в}}$ были введены — скалярный $\varepsilon_{\text{с}}$ и векторный $\varepsilon_{\text{в}}$ шумы СМ и ВМ, соответственно, средние квадратические отклонения (СКО) которых $\sigma_{\text{с}} = 0,01$ нТл, $\sigma_{\text{в}} = 1$ нТл. Вектор индукции МП Земли $\mathbf{B}$ формировали обычным образом — заданием угла магнитного наклона J , модуль $|\mathbf{B}|$ оставался постоянным на всей траектории “коробочки”. Моделирование проведено при $J = 60^\circ$ и $|\mathbf{B}| = 50$ мкТл.

Чтобы получить представление об уровне МП носителя, на фоне которого проводили настройку КМП, укажем, что на «коробочке» модуль вектора индукции $|\mathbf{B}_{\text{с}}|$ МП носителя изменялся в диапазоне 400–900 нТл, а помеховая составляющая $\mathbf{u}^T \mathbf{B}_{\text{с}}$ показаний СМ — в пределах 20–200 нТл. Это достаточно большие значения и, как будет показано ниже, стандартная модель (2) не позволяет качественно выполнить настройку КМП на их фоне.

В результате исследования настройки КМП установлено, что при выполнении условия (6) линейризованное уравнение (7) позволяет провести настройку КМП с погрешностью $\Delta U = U_{\text{СМ}} - U_{\text{КМП}}$, которая ограничена только шумами измерителей. Компенсационный сигнал $U_{\text{КМП}}$ представляет оценку помехи, формируемую КМП по результатам решения уравнения (7). Дело в том, что при выполнении условия (6) обнуляется нелинейная составляющая МП носителя в показаниях СМ, при этом левая часть уравнения (7) оказывается согласованной с его правой частью с точностью до пренебрежимо малых членов, пропорциональных $\eta_{\text{с}}^3$. Невыполнение условия (6), что характерно для практики, приводит к

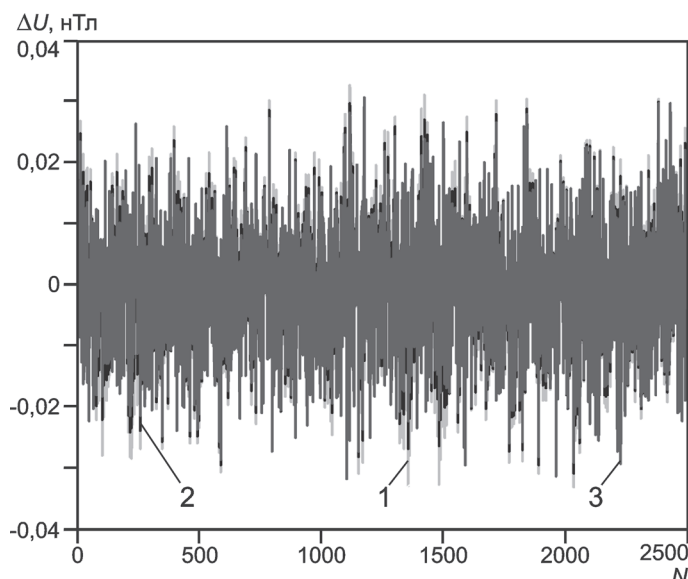


Рис. 3. Погрешности настройки КМП (МП носителя уменьшено в 10 раз): 1, 2, 3 те же, что на рис. 2

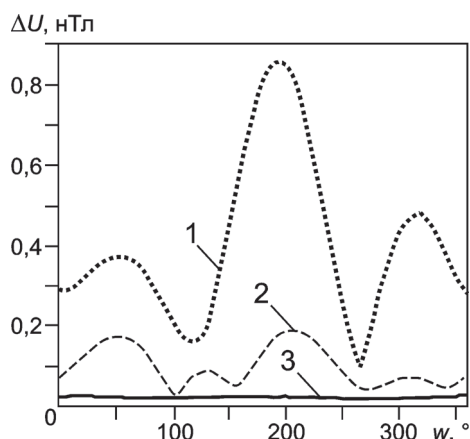


Рис. 4. Зависимости СКО погрешностей $\Delta U_{\text{л}}$, $\Delta U_{\text{лн}}$, $\Delta U_{\text{пл}}$ (соответственно кривые 1—3) компенсации МП носителя магнитометрической системы от его магнитного курса w

резкому возрастанию погрешности настройки. Этот вывод иллюстрирует рис. 1, где представлена зависимость СКО погрешности настройки КМП от $|\mathbf{B}_c|$ и $|\mathbf{B}_b|$. Зависимость построена для простейшего случая, когда структура МП носителя в окрестностях измерительных преобразователей СМ и ВМ одинакова, т. е. $\mathbf{b}_c = \mathbf{b}_b$. В этом случае условие компенсации нелинейной составляющей (6) сводится к виду $|\mathbf{B}_b| \approx 0,5|\mathbf{B}_c|$; его выполнение приводит к минимизации погрешности настройки КМП, что наглядно демонстрирует представленный график.

Итак, показано, что методические погрешности линейного КМП, т. е. такого, в основу которого положено линейаризованное уравнение (7), обусловлены нелинейной составляющей $O(\eta_{\text{эфф}}, \eta_b)$ МП носителя в показаниях СМ, и ее минимизация приводит к минимизации этих погрешностей. На практике нелинейная составляющая МП носителя минимизируется с помощью специальных технических мероприятий, направленных на обеспечение магнитной «стерильности» зоны носителя, в которой размещается блок измерителей магнитометрической системы. Однако возможность реализации этих мероприятий на ряде носителей весьма ограничена, что снижает эффективность применения указанной системы в частности, на вертолете.

Нелинейная настройка КМП. Создать техническими средствами такую структуру МП носителя, которая обеспечит выполнение условия (6), практически невозможно. Поэтому для минимизации рассмотренных выше методических погрешностей следует каким-либо способом учесть нелинейную составляющую $O(\eta_{\text{эфф}}, \eta_b)$. Исследовали несколько вариантов ее учета в процедуре настройки КМП. Ниже представлены результаты исследования алгоритма нелинейной настройки, в основу которого положено нелинейное уравнение КМП

$$U_{\text{СМ}}(t_k) = |\mathbf{B}_{\Sigma}|_{\text{нл}}, \quad (8)$$

где $|\mathbf{B}_{\Sigma}|_{\text{нл}}$ дается соотношением (3).

Разработанный алгоритм нелинейной настройки КМП включает два основных этапа. На первом этапе находят вектор оценок $\mathbf{x}_{\text{нл}} = [\hat{\mathbf{P}}_{\text{эфф}}, \hat{\mathbf{I}}_{\text{эфф}}, \hat{\mathbf{F}}_{\text{эфф}}]$ решения переопреде-

ленной системы линейных уравнений (7), основанных на модели (4). На втором этапе находят вектор оценок $\mathbf{x}_{\text{нл}} = [\hat{\mathbf{P}}, \hat{\mathbf{I}}, \hat{\mathbf{F}}]$ решения переопределенной системы нелинейных уравнений (8), в основу которых положена модель (3). При этом в качестве начальных условий (в качестве стартового вектора) принят вектор решения $\mathbf{x}_{\text{л}} = [\hat{\mathbf{P}}_{\text{эфф}}, \hat{\mathbf{I}}_{\text{эфф}}, \hat{\mathbf{F}}_{\text{эфф}}]$ линейаризованного уравнения КМП.

Исследование алгоритма нелинейной настройки КМП проведено в условиях тех же помех носителя, характеристики которых представлены выше. На рис. 2 визуализирована погрешность настройки КМП (остаточная помеха) $\Delta U = U_{\text{СМ}} - U_{\text{КМП}}$ для трех алгоритмов настройки КМП $\Delta U_{\text{л}}$, $\Delta U_{\text{лн}}$, $\Delta U_{\text{пл}}$ с использованием линейных (2), (4) и нелинейной (3) моделей.

Рис. 2 наглядно демонстрирует эффективность нелинейной настройки КМП и ограниченность линейных алгоритмов в части подавления нелинейной составляющей помехи. Влияние нелинейности подтверждает рис. 3, при построении которого МП носителя было уменьшено на порядок. В этом случае нелинейная составляющая $O(\eta^2)$ снизилась на два порядка, и все алгоритмы обеспечили подавление помехи до уровня шумов.

Компенсация МП носителя на произвольном маршруте выполняется следующим образом. В каждом такте измерений модуля и составляющих вектора КМП формирует компенсационный сигнал $U_{\text{КМП}}(t_k)$ на основе нелинейной модели (3) при использовании текущих показаний ВМ $U(t_k)$ и оценок коэффициентов МП носителя $\mathbf{x}_{\text{нл}} = [\hat{\mathbf{P}}, \hat{\mathbf{I}}, \hat{\mathbf{F}}]$, которые получены на этапе настройки КМП. Сформированный сигнал $U_{\text{КМП}}(t_k)$ вычитается из показаний $U_{\text{СМ}}(t_k)$, и, таким образом, компенсируются магнитные помехи, которые создает носитель скалярному магнитометру.

На рис. 4 представлены зависимости СКО погрешностей компенсации МП носителя от его магнитного курса w для трех моделей (2)—(4). Представленные графики наглядно демонстрируют эффективность КМП, который базируется на нелинейной модели (3) МП носителя. Следует отметить, что если оставаться в рамках линейного КМП, то уравнение компенсатора целесообразно формировать на основе модели (4).

Выводы. Нелинейный компенсатор магнитных помех обеспечивает эффективное подавление магнитных помех носителя, существенно превосходя в этом стандартные линейные процедуры.

Л и т е р а т у р а

1. Bickel S. H. Small Signal Compensation of Magnetic Fields Resulting from Aircraft Maneuvers // IEEE Trans. 1979. V. AES-15. N. 4. P. 518—524.
2. Leach B. W. Aeromagnetic Compensation as a Linear Regression Problem // Information Linkage between Applied Mathematics and Industry. II. Academic Press, 1980. P. 139—161.
3. Семевский Р. Б., Аверкиев В. В., Яроцкий В. А. Специальная магнитометрия. СПб.: Наука, 2002.

Дата принятия 10.12.2013 г.