

Работы молодых учёных

УДК 550.814

КОМПЕНСАЦИЯ МАГНИТНЫХ СВОЙСТВ ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА

© 2007 М.В. Харичкин

*Механико-математический факультет МГУ, Лаборатория управления и навигации;
e-mail: mv_harichkin@mail.ru*

Предлагается новый подход к решению задачи компенсации магнитной помехи, создаваемой самолетом или вертолетом при аэромагнитной съемке для построения карт аномалии магнитного поля. Особенности этого метода — введение стохастической модели магнитного поля Земли и получение стандартной постановки задачи оценивания для решения методом Калмановской фильтрации. Достоинство предлагаемого метода состоит в том, что не вводятся искусственные ограничения на параметры модели девиации, появляющиеся в уже существующих методиках.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время аэромагнитометрия является наиболее распространенным методом аэрогеофизической съемки. Это определяется многими факторами, среди которых высокое качество магнитометрического оборудования, его малый размер и сравнительно небольшая цена. Сказывается также и большой опыт обработки данных магнитной съемки, и развитие программного обеспечения, которое упрощает многие процедуры, связанные с интерпретацией полученных материалов.

Требования по точности к данным аэромагнитной съемки составляют порядок 10^{-5} к величине поля при построении карт масштаба 1:5000. Ограничение во многом связано с техническими возможностями существующей съемочной аппаратуры, однако, уже появляются датчики, обладающие существенно большей точностью измерений (Вершовский и др., 2000) и, следовательно, получение алгоритмов более сложной и качественной обработки становится важной задачей.

При проведении магнитных съемок с использованием самолета или вертолета на датчик прибора действует не только магнитное поле Земли (МПЗ), но и поле самого носителя, что вызывает искажение результатов измерений.

Возникает проблема устранения влияния поля носителя, которая может решаться различными способами.

Одним из решений является установка датчика магнитометра в гондole, буксируемой за летательным аппаратом на трос-кабеле длиной 30 и более метров (рис. 1). При таком удалении нет влияния летательного аппарата на измерения, и требуется только компенсация небольшого влияния самой гондолы. Этот метод активно эксплуатируется в ГНПП «Аэрогеофизика» и в других российских аэросъемочных предприятиях. Установка навигационного оборудования GPS в



Рис. 1. Гондольное крепление датчика, Ан-2, ГНПП «Аэрогеофизика», 2004 г.

гондолу позволяет проводить аэромагнитные съемки масштаба 1:5000.

Другой подход, распространенный главным образом за рубежом, связан с компенсацией влияния магнитных свойств летательного аппарата на показания датчика, установленного на специальном жестком креплении - стингере (рис. 2). Многие иностранные заказчики делают необходимым условием использование жесткого крепления



Рис. 2. Жесткое крепление датчика, Ан-2, АК Алроса, 2005 г.

датчика при проведении аэромагнитной съемки. К недостаткам жесткого крепления следует отнести то, что при проведении измерений датчик находится в зоне повышенных магнитных помех и тем самым появляется необходимость в их дальнейшей компенсации.

До развития цифровых технологий в аэрогеофизической магнитной съемке применялась так называемая физическая компенсация, заключающаяся в установке на борту источников поля, настраиваемых для минимизации наведенных помех. Качество такой компенсации могло составлять 1-2 нТл (Вацуру и др., 1983). В настоящее время применяется другой подход, сводящийся к вычислению нужной поправки. Есть несколько коммерческих программ, реализующих похожие алгоритмы компенсации. Среди них наиболее известны программы канадских компаний «Pico Envirotec» и «RMS Instruments» (Exploration ..., 2005). Есть и российский аналог, разработанный в ФГУ НПП «Геологоразведка» (Могилевкин и др., 2001).

Отметим, что подходы к решению задачи компенсации хорошо исследованы и опираются на представление магнитной помехи суммой полей, обусловленных постоянными, индуктивными и вихревыми источниками, для описания которых используется модель Пуассона (Лысенко, 1960). Иногда используется также информация о высоте для учета вертикального градиента магнитного поля земли (Могилевкин и др., 2001).

На основании нового подхода к задаче компенсации автором статьи совместно с коллегами из ЗАО «Геотехнологии» была разработана программа компенсации магнитных помех REINMAG (Волковицкий и др., 2007). Программа работает в режиме постобработки, но подобранные параметры компенсации могут быть применены также и в реальном времени. Предложенный метод опирается на пуассоновское описание магнитных помех, но обладает рядом особенностей.

Чтобы решить задачу компенсации измеряются скалярная величина модуля вектора индукции магнитного поля B , определяемая с высокой точностью (0.1-0.2 нТл) квантовым или протонным магнитометром, и компоненты вектора индукции B_F , определяемые с меньшей точностью (15-20 нТл) феррозондовым магнитометром (Магниторазведка, 1990).

Отметим, что в настоящее время на практике при съемках с подвижных носителей чаще всего используются квантовые датчики, т.к. они имеют лучшие частотные параметры и точность, работают в сильно градиентных полях и на подвижных основаниях, чего не могут протонные.

Методика списания помехи, как обычно, требует подъема летательного аппарата на максимальную высоту для минимизации влияния аномального МПЗ. При этом амплитуда аномалии может составить не одну сотню нТл, однако ее характерная длина составляет несколько километров, что позволяет отличить ее от изменений магнитного поля, связанных с эволюциями летательного аппарата. На этой высоте совершается ряд эволюций по рысканию, крену и тангажу на четырех различных курсах. Для измерения этих эволюций используется трехкомпонентный феррозондовый датчик магнитного поля, также установленный на стингере.

Основная особенность метода, реализуемого программой REINMAG, в подборе единых параметров компенсации независимо от курса

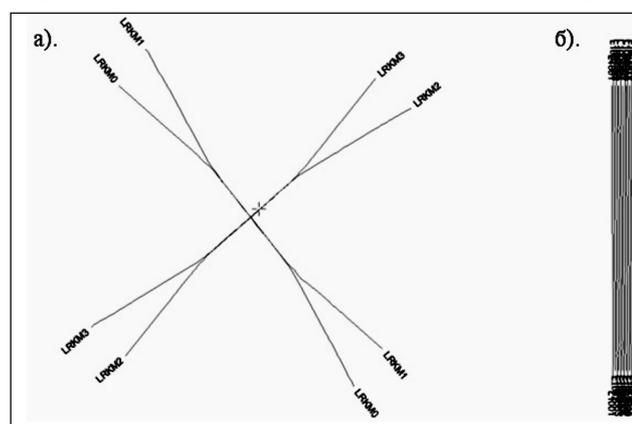


Рис. 3. Маршруты калибровки (а) и съёмки (б). Якутия, 2005 г.

летального аппарата (рис. 3). Для этого вводится стохастическая модель аномального МПЗ, в которой поле и его градиенты моделируются стохастическими случайными процессами с заданными спектральными характеристиками. Спектральные характеристики подбираются на основе анализа реальных данных. Полученные в результате решения задачи в такой постановке параметры оказываются применимы для любых направлений полета.

При работе программы REINMAG, в отличие от ранее предлагаемых методов, методом Калмановской фильтрации (Александров и др., 2000) подбираются как параметры магнитных помех, так и реализации описанных случайных процессов, т.е. оценивается аномальное магнитное поле и его градиент (Волковицкий и др., 2007). Не стоит при этом забывать, что протонные и квантовые датчики магнитометра работают не при всех направлениях вектора магнитного поля. Поэтому ограничения на допустимые курсы летательного аппарата все же есть.

Особняком стоит задача компенсации магнитных помех в случае вертолета-носителя. Общепринятым здесь является подход, реализующий полосовую фильтрацию помехи, создаваемой несущим винтом. Однако даже при небольших эволюциях конуса винта характер помехи меняется довольно динамично, что может дать ощутимый остаток после фильтрации.

Для оценки остатка компенсации была построена приближенная аналитическая модель магнитных свойств несущего винта, позволяющая дополнить набор параметров намагничивания фюзеляжа. При построении модели несущего винта предполагалось, что лопасти однородно намагничены, а их поперечные размеры малы по отношению к длине.

На основании полученной модели было проведено численное моделирование помехи, создаваемой несущим винтом при различных эволюциях. Параметры модели были подобраны

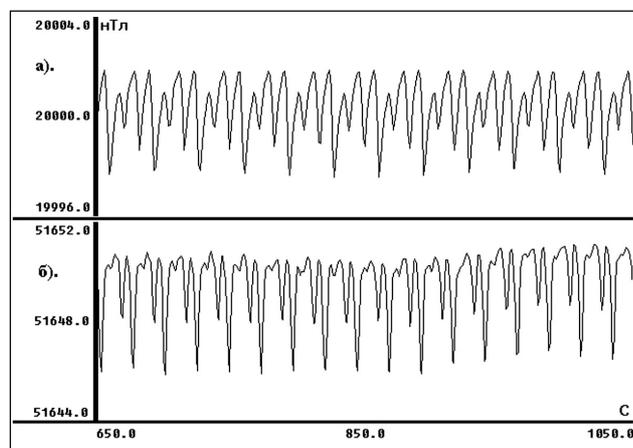


Рис. 4. Сравнение модельных (а) и реальных (б)

по результатам аэромагнитной съемки, проведенной ГНПП «Аэрогеофизика» в Московской области на вертолете Ми-2. На рис. 4 отображены модельные и реальные данные. Видно, что данные обладают внешним сходством.

В верхней части рис. 5 приведены графики модельных данных для разных углов раствора конуса несущего винта. В средней части построены их низкочастотные составляющие, которые обычно получают при обработке данных для вертолета по методу полосовой фильтрации. В нижней части построена разность низкочастотных составляющих, которая является погрешностью метода полосовой

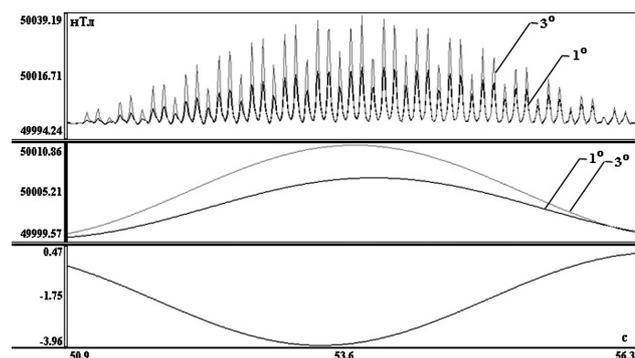


Рис. 5. Оценка ошибки при полосовой фильтрации по результатам моделирования для 1° и 3° раствора конуса несущего винта.

фильтрации, так как данный метод не позволяет сделать различие для разных растворов несущего винта.

На основе построенной модели можно показать, что при осреднении высокочастотной компоненты магнитной помехи, наведенной несущим винтом, остаток, связанный с малыми, до 3-х градусов, медленными эволюциями конуса угла, в отдельных случаях достигает 3-4 нТл.

Еще один аспект, о котором надо помнить при решении задачи компенсации, — это влияние бортового электронного оборудования. Интересное решение предлагает ФГУ НПП «Геологоразведка». Идея заключается в измерении на борту токов и последующем подборе коэффициентов их влияния. Однако этот метод пока не получил широкого распространения.

РЕЗУЛЬТАТЫ КОМПЕНСАЦИИ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Приведем некоторые результаты работы программы REINMAG по данным, полученным Амакинской ГРЭ «Алроса» в Якутии в 2005 г. при проведении аэромагнитной съемки. На рис. 6 изображены три группы графиков. На верхней группе графики измерений магнитного поля до и после компенсации. В середине — их высокочастотные компоненты. Внизу — высота. Видно, что остаток в скомпенсированных измерениях находится

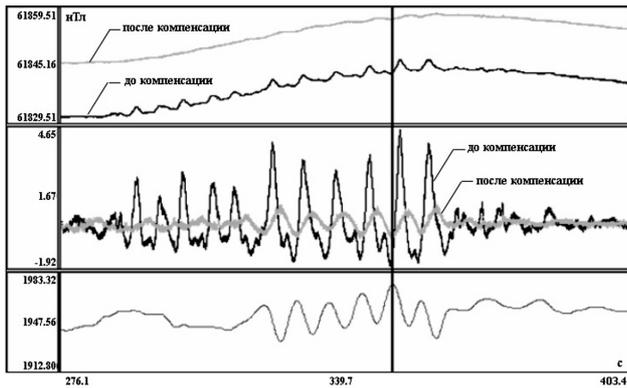


Рис. 6. Результаты работы программы REINMAG, Ан-2, Якутия, 2005 г. до и после компенсации.

строго в противофазе с изменениями высоты, т.е. отражает перемещение в градиентном поле - с набором высоты поле уменьшается.

Точность прохождения через центральную точку составила несколько метров, а повторяе-



Рис. 7. Сравнение результатов компенсации.
Коррекция в точке 1.94 нТл.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложен новый подход к решению задачи компенсации магнитной помехи, создаваемой самолетом или вертолетом при аэромагнитной съемке. Основной особенностью данного подхода является введение стохастической модели аномального МПЗ. В такой постановке задача оценивания и может быть решена методом Калмановской фильтрации.

Достоинство предлагаемого метода состоит в том что, в отличие от ранее предлагаемых методов, подбираются как параметры магнитных помех, так и реализации случайных процессов, описывающих аномальное МПЗ. Полученные в результате решения задачи в такой постановке параметры оказываются применимы для любых направлений полета.

Метод был успешно применен при обработке результатов аэромагнитной съемки проведенной Амакинской ГРЭ «Алроса» в Якутии в 2005 г.

мость показаний магнитометра при разных курсах – 0.2 нТл. При этом во время обработки не вводились ни магнитные вариации, ни дифференциальные поправки GPS.

На рис. 7 показано качество компенсации при картировании аномального поля. Видно, что данные «результат компенсации» (данные, полученные на жестком креплении после работы программы) и «гондольное крепление» во многом схожи, а «жесткое крепление» (первоначальные данные, полученные на жестком креплении) содержат отличия, являющиеся следствием влияния магнитных помех.

Величина коррекции в точке показывает разницу между высокочастотными составляющими данных до и после компенсации. Видно, что аномалия, присутствующая в данных до компенсации, на самом деле является магнитной помехой, т.к. пропадает после компенсации.

Список литературы

- Александров В.В., Болтянский В.Г., Лемак С.С. и др. Оптимизация динамики управляемых систем. М: МГУ, 2000. 304 с.
- Вацуро А.Э., Цирель В.С., Эринчек Ю.М., Андреев В.Я. Рекомендации по компенсации магнитных помех носителей аэрогеофизической аппаратуры. Л: НПО «Рудгеофизика», 1983. 108 с.
- Вершовский А.К., Пазгалев А.С., Александров Е.Б. Проект Л-СТС магнитометра // Журнал технической физики. 2000. Т. 70. Вып. 1. С. 88–93.
- Волковицкий А.К., Каршаков Е.В., Харичкин М.В. / Система аэромагнитной съемки аномалий магнитного поля // Датчики и системы. 2007. № 8. С. 17–21.
- Лысенко А.П. Теория и методы компенсации магнитных помех // Геофизическое приборостроение. 1960. Вып. 7. С. 44–58.
- Магниторазведка // Справочник геофизика под редакцией В.Е. Никитского и Ю.С. Глебовского. 2-е изд., перераб. и доп. М: Недра, 1990. 470 с.
- Могилевкин В.А., Аверкиев В.В., Герловин М.С. и др. Компенсация магнитных помех авиационных носителей // Разведка и охрана недр. 2001. № 9. С. 52–58.
- Exploration Trends and Developments. March, 2005. Ed.: Brian Sylvester, Geological Survey of Canada, Ottawa. 18 p.

КОМПЕНСАЦИЯ МАГНИТНЫХ СВОЙСТВ ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА
AIRCRAFT'S MAGNETIC COMPENSATION

Harichkin M.V.

Mechanics and Mathematics department of MSU, The control and navigation laboratory

This article deals with the new aeromagnetic compensation system developed on the classic aircraft magnetic-interference model extended by stochastic process. The last one is used for modeling of magnetic field anomaly and magnetic field gradient. The deviation parameters are obtained by solution of the standard linear estimation task. The main advantage of this method is that there are no artificial limitations, which are presented in other methods.