

АНАЛИЗ СПОСОБОВ КОМПЕНСАЦИИ НАВЕДЕННОЙ ПОМЕХИ И МОДЕЛИРОВАНИЯ ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ СРЕДЫ МЕТОДОМ ИНВЕРСИИ ПРИ ОБРАБОТКЕ ДАННЫХ АЭРОЭЛЕКТРОРАЗВЕДКИ

Власов Л. Н.¹, Каплун Д. В.², Третьякова Е. А.³,
Хлюстов Д. К.⁴

(ФГБУН Институт проблем управления
им. В. А. Трапезникова РАН, Москва)

Проведено сравнение различных методов компенсации наведенной помехи для системы ЭКВАТОР и нескольких модификаций бортовой электромагнитной системы «ЕМ4Н»: с петлей передатчика, закрепленной на фюзеляже самолета, и с петлей, буксируемой вертолетом. Рассмотрены два способа моделирования помех сигналов передатчиков: в виде стационарной систематической составляющей измерений и в виде стационарного вектора поля, жестко связанного с передатчиком. Для реализации второго подхода в «ЕМ4Н» и ЭКВАТОР используются два дополнительных диполя для определения взаимного расположения передатчика и приемника, а именно радиус-вектора и углов ориентации. На большой высоте при отсутствии отклика от земли анализировались следующие статистические параметры сигналов, оставшихся после компенсации помех: среднеквадратическое отклонение и разность минимального и максимального значений. Показано, что наилучший результат компенсации дает подход, при котором учитывается перемещение приемника относительно источника поля. Следующим после компенсации этапом обработки являлась интерпретация данных, направленная на выявление значимых геофизических характеристик. Для каждой из рассматриваемых систем были построены разрезы удельных электрических сопротивлений, полученные в результате решения соответствующей стохастической задачи оценивания с использованием фильтра Калмана, для которых было проведено сравнение разрешающей способности.

Ключевые слова: аэроэлектроразведка, компенсация, переменное электромагнитное поле, источник, приёмник, магнитный диполь, одномерная модель, фильтр Калмана, ЕМ4Н, ЭКВАТОР.

¹ Лев Николаевич Власов, вед. инженер (Leo_Vlassov@yahoo.com).

² Дмитрий Владимирович Каплун, вед. инженер (dvkaplun@yandex.ru).

³ Екатерина Алексеевна Третьякова, м.н.с. (ekaterina_tretikova@mail.ru).

⁴ Дмитрий Кириллович Хлюстов, аспирант (hlustov.d@gmail.com).

1. Введение

Аэроэлектроразведка является одним из наиболее популярных геофизических методов, используемых при разведке полезных ископаемых во всем мире [5, 10, 12, 14]. В разных странах создано большое количество аэроэлектроразведочных систем, отличающихся как конструкцией передатчика и приемника, так и способами компенсации различных помех.

Разработчики всех видов систем постоянно повышают чувствительность измерительной аппаратуры. В связи с этим необходимо проводить анализ соответствия методов компенсации помех уровню чувствительности. В первой части данной работы анализируется соответствие существующих моделей и методов компенсации помех современному уровню чувствительности аппаратуры.

Кроме того, постоянно совершенствуются методы интерпретации данных электроразведки. Одним из методов интерпретации является одномерная инверсия, в результате которой получается модель среды в виде набора горизонтальных слоев с различным удельным сопротивлением.

Таким образом, обработка данных аэроэлектроразведки состоит из двух этапов. На первом этапе выполняется компенсация помех, на втором – построение модели среды.

Основным источником помех в аэроэлектроразведке являются неконтролируемые вихревые токи, возникающие в проводящих конструктивных элементах аэроэлектроразведочной системы. В случае, когда петли генератора, являющиеся источниками поля, установлены на самолете или вертолете, вихревые токи могут создавать поле, составляющее около 1% от поля генераторной петли. Это существенно затрудняет выделение вторичного поля на фоне первичного [15].

Наиболее простым способом является задание модели поля вихревых токов в виде постоянного вектора. Этот способ ненадежен, так как поле вихревых токов зависит от изменяющегося взаимного расположения передатчика и приемника поля.

Более сложный способ основан на учете изменяющейся геометрии установки. Для определения взаимного расположе-

ния приемника и передатчика переменного магнитного поля, а именно радиус-вектора и углов ориентации, решается обратная задача. Она заключается в определении параметров источника магнитного поля по параметрам поля, которое измеряется приемником [6, 7, 13].

Анализ проводился с использованием данных систем ЕМ4Н и ЭКВАТОР, широко используемых в современных исследованиях [1, 2].

Данные, полученные на этапе компенсации, являются входными данными для выполнения одномерной инверсии.

Вторая часть настоящей статьи посвящена сравнению результатов обработки данных, полученных тремя конфигурациями систем: четырехчастотная самолетная система ЕМ4Н, установленная на самолете АН-3; буксируемая вертолетом Eurocopter AS350 В3 модификация той же четырехчастотной системы; буксируемая вертолетом Eurocopter AS350 В3 система ЭКВАТОР, производящая измерения в частотной и временной областях. Для всех вариантов произведена инверсия данных. Испытания проведены Норильским филиалом Института им. А. П. Карпинского по одному профилю, расположенному в Норильском районе.

2. Постановка задачи компенсации аэроэлектроразведочных данных

Аэроэлектроразведочное оборудование систем с контролируемым источником [3] включает в себя передатчик и приемник (рис. 1).

С помощью петли передатчика создается первичное поле. На удалении большем, чем диаметр петли, такое поле эквивалентно полю магнитного диполя с вектором магнитного момента \mathbf{M} , который направлен перпендикулярно плоскости петли, а его модуль $|\mathbf{M}| = ISn$, где I – сила тока в петле в амперах; S – площадь петли в квадратных метрах; n – количество витков провода в петле. Приемник рассматриваемых в работе систем располагается в буксируемой гондоле и регистрирует параметры вторичного поля. При измерении переменного поля необхо-

димо учитывать поле вихревых токов. Оно возникает в токопроводящих элементах конструкции петли передатчика и может быть описано моделью диполя с моментом $\Delta\mathbf{M}$. Это влияние является причиной возникновения помех $\Delta\mathbf{H}$, которая на практике значительно больше амплитуды аномальной составляющей поля. Вектор $\Delta\mathbf{M}$ считается постоянным в системе координат, связанной с петлей передатчика, что вытекает из предположения о геометрической устойчивости электропроводящих частей самолета или других элементов, на которых закреплена петля. Вектор $\Delta\mathbf{H}$, измеряемый приемником, не является постоянным в его системе координат, так как изменяется взаимное расположение передатчика и приемника.

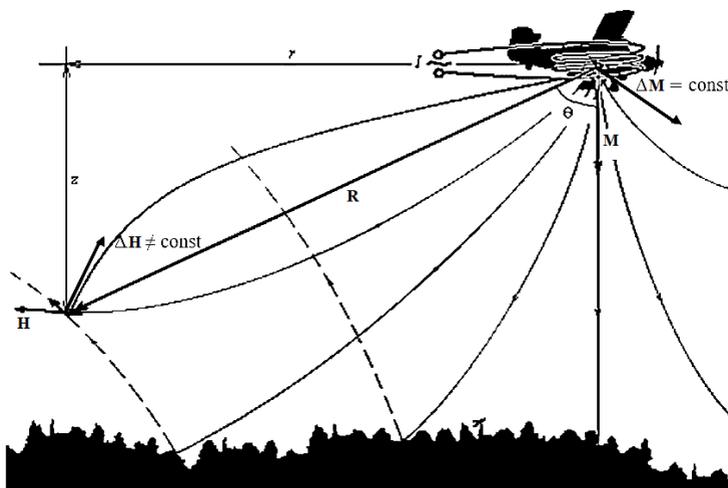


Рис. 1. Аэроэлектроразведочная система ЕМ4Н, самолетная модификация. \mathbf{R} – радиус-вектор источник-приемник; \mathbf{M} – вектор магнитного момента возбуждающего диполя; $\Delta\mathbf{M}$ – вектор магнитного момента наведенного поля; \mathbf{H} – вектор напряженности поля возбуждающего диполя; $\Delta\mathbf{H}$ – вектор напряженности наведенного поля

Очевидно, что влияние помех необходимо учитывать. Для этого проводится процедура компенсации, суть которой заклю-

чается в перемещении системы на большую высоту (500–700 м), где откликами от земли можно пренебречь, и в выполнении интенсивных эволюций, приводящих к существенным изменениям взаимного расположения передатчика и приемника. В процессе компенсации определяются параметры поля вихревых токов. Далее вносятся поправки в измерения поля на высоте съемки. Существуют различные подходы к методу компенсации. Если приемник совершает небольшие перемещения относительно передатчика, то можно принять допущение о постоянстве вектора наведенного поля $\Delta \mathbf{H}$ в системе координат, жестко связанной с приемником. Этот метод, основанный на вычитании постоянной составляющей, используется во многих современных системах и называется «nulling» (зануление).

Другой подход основан на учете изменчивости вектора $\Delta \mathbf{H}$. Для этого проводится анализ взаимного расположения передатчика и приемника, расстояние и угол между которыми постоянно меняются [15].

3. Методы компенсации с учетом изменения относительного положения передатчика и приемника

В данной работе рассматриваются электромагнитные системы, представляющие собой системы с контролируемым источником в виде горизонтальной петли с током. Нормальную составляющую поля можно представить через соотношение для точечного диполя. В работах [6, 7, 13] оно записано в системе координат приемника в матричной форме (1). Эта зависимость позволяет переписать соотношения для поля в виде

$$(1) \quad \mathbf{H} = \frac{1}{4\pi |\mathbf{R}|^3} \left(3 \frac{\mathbf{R}\mathbf{R}^T}{|\mathbf{R}|^2} - I \right) \mathbf{M} = \Omega(\mathbf{R})\mathbf{M},$$

где \mathbf{H} — вектор магнитного поля; \mathbf{R} — вектор положения приемника относительно передатчика; \mathbf{M} — вектор магнитного момента диполя; I — единичная матрица 3×3 .

Согласно [1, 15], была выведена связь между измеряемым полем, генерируемым моментом и относительным положением передатчика и приемника. Она представлена матрицей $\Omega(r)$:

$$(2) \quad \Delta \mathbf{H} = \Omega(R) \Delta \mathbf{M}.$$

Компенсация с двумя дополнительными диполями.

В статьях [6, 7] показана возможность установки дополнительных петель на платформе передатчика, векторы дипольных магнитных моментов которых \mathbf{M}_1 и \mathbf{M}_2 позволяют определить базис и получить разложение вектора магнитного момента наведенной помехи $\Delta \mathbf{M}$ в этом базисе:

$$(3) \quad \Delta \mathbf{M} = k_0 \mathbf{M} + k_1 \mathbf{M}_1 + k_2 \mathbf{M}_2, \quad k_j \in \mathbf{R}.$$

Применяя (2), получим такое же представление вектора поля вихревых токов $\Delta \mathbf{H}$, при этом коэффициенты его линейного разложения в базисе векторов поля основного \mathbf{H} и дополнительных диполей \mathbf{H}_1 и \mathbf{H}_2 будут такими же, как в выражении (3):

$$(4) \quad \Delta \mathbf{H} = k_0 \mathbf{H} + k_1 \mathbf{H}_1 + k_2 \mathbf{H}_2.$$

В отсутствие отклика вектор $\Delta \mathbf{H}$ должен быть равен 0. Это является основанием для постановки задачи оценивания коэффициентов k_0, k_1, k_2 методом наименьших квадратов. При этом необходимо учитывать, что измеряемый вектор \mathbf{H} – это трехкомпонентный вектор амплитуды переменного магнитного поля определенной частоты ω . Каждая компонента этого вектора является комплексным числом. Если предположить, что ток в петле имеет форму $I(t) = I \cos(\omega t)$, то компоненты измеренного вектора поля будут иметь вид $\operatorname{Re} H_i \cos(\omega t) + \operatorname{Im} H_i \sin(\omega t)$, $i = 1, 2, 3$. Действительную часть комплексного вектора \mathbf{H} также называют синфазной (т.е. совпадающей по фазе с первичным полем) компонентой, а мнимую – квадратурной. Таким образом, при реализации метода наименьших квадратов квадратурная составляющая поля минимизируется, а синфазная составляющая поля приводится к одному вектору, соответствующему полю на всех рабочих частотах диполя \mathbf{M} (главный зондирующий диполь обычно возбуждает несколько гармоник).

Компенсация с одним дополнительным диполем.

Можно ли решить задачу компенсации, используя только один дополнительный диполь? В работе [9] отмечено, что решение есть. А именно, авторами предложен алгоритм решения задачи электромагнитного позиционирования вдоль поля двух диполей. В результате можно вывести следующие нелинейные выражения:

$$(5) \quad \mathbf{H}'_2 = \mathbf{F}_2(\mathbf{H}, \mathbf{H}_1), \quad \mathbf{H}'_2 = \mathbf{F}_1(\mathbf{H}, \mathbf{H}_2).$$

То есть мы можем заменить реально работающий диполь вектором, вычисленным, например, через векторное произведение двух имеющихся диполей:

$$(6) \quad \mathbf{H}'_2 = \Omega(\mathbf{R}) (\mathbf{M} \times \mathbf{M}_1), \quad \mathbf{H}'_1 = \Omega(\mathbf{R}) (\mathbf{M} \times \mathbf{M}_2).$$

Используя (5), можно перейти к линейной комбинации вектора поля вихревых токов, подставив полученную зависимость в выражение (4):

$$(7) \quad \Delta \mathbf{H} = k_0 \mathbf{H} + k_1 \mathbf{H}_1 + k_2 (\mathbf{F}_2(\mathbf{H}, \mathbf{H}_1)),$$

$$(8) \quad \Delta \mathbf{H} = k_0 \mathbf{H} + k_1 (\mathbf{F}_1(\mathbf{H}, \mathbf{H}_2)) + k_2 \mathbf{H}_2.$$

Перемещение носителя относительно профиля порождает колебательное движение приемника относительно передатчика, которое влияет на получаемые измерения. Для исключения колебательной составляющей из измерений учитывается относительное смещение. Важно, чтобы величина пространственного смещения приемника и передатчика не превышала 10 м. Это наблюдение позволяет надеяться, что зависимость (5) может быть линеаризована, при этом точность линейной аппроксимации будет достаточной для проведения компенсации. Тогда уравнения (7), (8) можно переписать в виде

$$(9) \quad \Delta \mathbf{H} = \rho_{01} \mathbf{H} + \rho_1 \mathbf{H}_1 = \rho_{02} \mathbf{H} + \rho_2 \mathbf{H}_2.$$

Следовательно, возможно использование только одного дополнительного диполя \mathbf{M}_1 или \mathbf{M}_2 . Далее эта гипотеза проверяется на серии данных системы ЭКВАТОР и различных модификаций системы ЕМ4Н, полученных в ходе производственных полетов Норильского филиала ВСЕГЕИ им. А.П. Карпинского и АО «ГНПП «Аэрогеофизика».

4. Сравнение методов компенсации

Проведено сравнение различных способов компенсации для системы ЭКВАТОРА (рис. 3) и нескольких модификаций бортовой электромагнитной системы «EM4H»: с петлями, закрепленной на фюзеляже самолета Ан-3, и с петлями, буксируемой вертолетом Eurocopter AS350B3 (рис. 2).

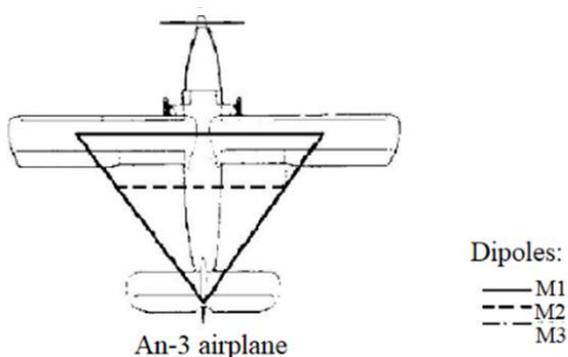


Рис. 2. Конструкция генераторных и компенсирующих петель самолетной модификации системы EM4H

В полете на большой высоте при отсутствии отклика с земли анализировались следующие статистические параметры сигналов, оставшихся после компенсации помех: среднее квадратическое отклонение и разность минимального и максимального значений. Результаты сравнения приведены в таблицах 1 и 2 и на рис. 4 и 5.

В таблицах приведены среднее квадратическое отклонение (СКО) и размах (максимум-минимум) для квадратурной составляющей поля. В идеальных условиях отсутствия помех оно должно быть равно нулю.

Значения приведены после компенсации систематического смещения приемника («nulling» (зануление), рис. 4б, рис. 5г), а также после определения геометрических параметров с ис-

пользованием первого (рис. 4а, рис. 5б), второго (рис. 5в) или двух (рис. 5а) дополнительных диполей.

В случае использования самолета второй дополнительный диполь отсутствовал (рис. 4).

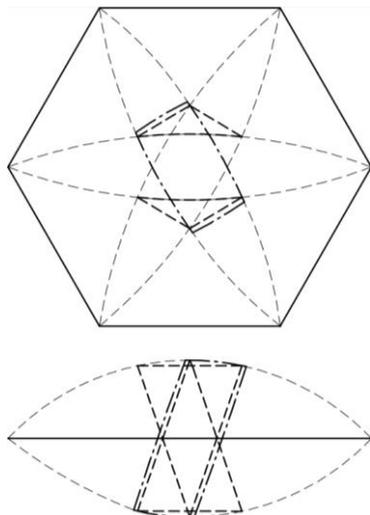


Рис. 3. Генераторная и компенсирующие петли буксируемой вертолетом системы ЕМ4Н и системы ЭКВАТОР

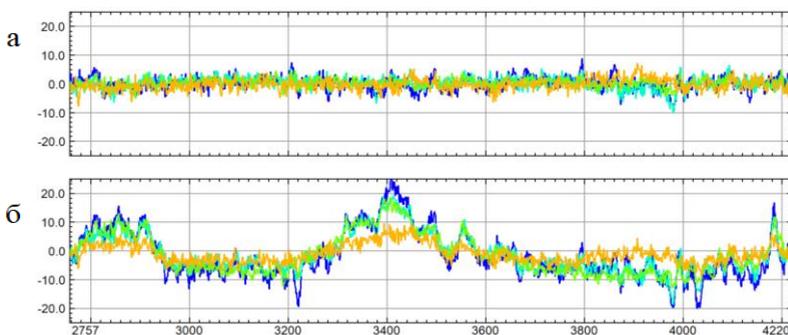


Рис. 4. Квадратурная составляющая для самолета Ан-3 на 4 частотах: а) после компенсации с использованием измерений параметров дополнительного диполя; б) зануление

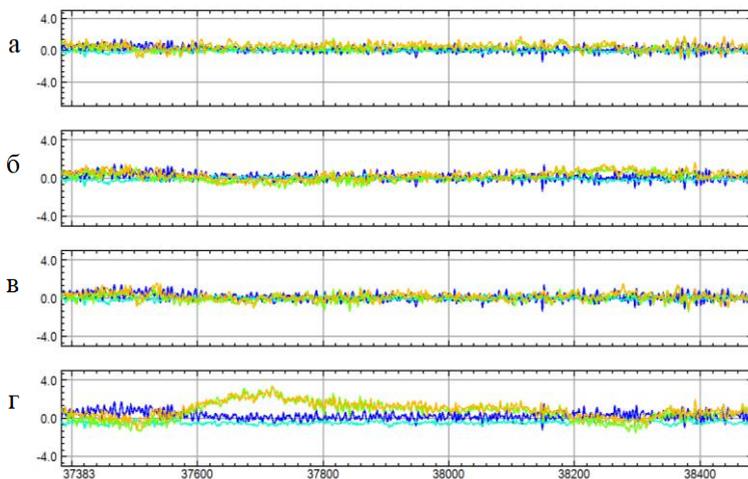


Рис. 5. Квадратурная составляющая для вертолета Ми-8 на 4 частотах: а) после компенсации с использованием измерений параметров двух дополнительных диполей; б) с использованием 1-го диполя; в) с использованием 2-го диполя; г) зануление

Таблица 1. Статистические характеристики различных методов компенсации на высоких частотах (8 кГц – ЕМ4Н, 6 кГц – ЭКВАТОР)

	зануление	1 ^й и 2 ^й диполи	1 ^й диполь	2 ^й диполь	improvement factor	
Самолет Ан-3	4,53		2,17		2,1	RMS
	41,92		15,04		2,8	max-min
Вертолетная буксируемая система	20,27	1,16	1,28	1,37	15,8	RMS
	92,88	8,14	8,10	9,34	11,5	max-min
ЭКВАТОР	11,04	1,15	1,17	1,42	9,44	RMS
	53,47	9,59	10,08	10,75	5,30	max-min

Таблица 2. Статистические характеристики различных методов компенсации на низких частотах (130 Гц – ЕМ4Н, 77 Гц – ЭКВАТОР)

	зануление	1 ^й и 2 ^й диполи	1 ^й диполь	2 ^й диполь	improvement factor	
Самолет Ан-3	12,61		2,52		5,0	RMS
	121,53		21,42		5,7	max-min
Вертолетная буксируемая система	1,73	1,44	1,46	1,46	1,2	RMS
	10,70	10,09	9,65	9,16	1,1	max-min
ЭКВАТОР	0,29	0,22	0,22	0,23	1,3	RMS
	1,84	1,56	1,59	1,71	1,1	max-min

Один из столбцов таблиц представляет собой коэффициент улучшения, выведенный как отношение соответствующих значений при использовании зануления и компенсации с помощью одного (первого) диполя.

Как видно из таблиц, наилучший результат компенсации дает подход, при котором учитывается перемещение приемника относительно источника поля. Это справедливо для ЭКВАТОР и всех конфигураций системы ЕМ4Н, в том числе для буксируемой системы, находящейся далеко от фюзеляжа вертолета. В таблице 2 мы видим, что наведенное поле на низкой частоте для такой системы практически отсутствует. Однако на высоких частотах оно существенно. Поэтому и для буксируемой системы при компенсации необходимо учитывать геометрию установки.

Еще один важный вывод: использование линейной модели поля вихревых токов как функции поля двух диполей так же эффективно, как и использование полного линейного разложения по трем диполям. Поэтому компенсацию можно осуществлять в поле двух диполей в линейной формулировке.

5. Построение модели среды, значимой для геологических и геофизических приложений

После проведения компенсации данные пригодны для дальнейшей обработки, в результате которой получают инфор-

мацию, значимую для геологических и геофизических приложений. Один из подходов состоит в построении модели среды, создающей поле, значения которого близки к значениям поля, полученным в результате компенсации.

Модель может обладать разной степенью детальности. Так, в наиболее общем случае среда представляется трехмерной сеткой, учитывающей особенности рельефа местности и неравномерность распределения сопротивлений. Однако при таком подходе обратная задача (определение параметров по результатам измерений вторичного поля) становится некорректной. Кроме того, объем вычислений растет пропорционально количеству узлов в сетке, в связи с чем время моделирования становится неприемлемо большим.

Более практичным подходом, в то же время предоставляющим удовлетворительную точность, является построение одномерной модели, подробнее описанной в следующем разделе.

6. Формулировка модели одномерной инверсии

Одномерная модель, также называемая горизонтально-слоистой [3], строится исходя из допущения, что параметры среды мало изменяются на масштабах расстояний, характерных для интервала зондирования. В связи с этим для каждой точки измерения вторичного поля подбираются значения удельных сопротивлений, неоднородные по глубине и однородные в горизонтальном направлении. После получения оценки для каждой точки зондирования модели объединяются, в результате чего и получается картина геоэлектрического разреза.

В настоящей работе модель среды состояла из 25 слоев с фиксированной толщиной, заданной формулой $d_i = 4 \cdot 1,1085^{i-1}$ м, $i = 1, \dots, 24$, $d_{25} = \infty$. Таким образом, вектор оцениваемых параметров состоял из удельных сопротивлений $\mathbf{x} = (\rho_1, \dots, \rho_{25})$.

Данные, используемые для инверсии, содержат действительную (синфазную) и мнимую (квадратурную) части вертикальной компоненты вторичного магнитного поля в частотной области и усредненные в нескольких временных интервалах

значения переходного процесса во временной области. Вектор измерений частотной области имеет вид

$$(10) \quad \mathbf{z}_\omega = (\text{Im } \omega_1, \dots, \text{Im } \omega_n, \text{Re } \omega_2 - \text{Re } \omega_3, \dots, \text{Re } \omega_{n-1}),$$

где $\text{Im } \omega_i$ и $\text{Re } \omega_i$ обозначают квадратурную и синфазную составляющие отклика для частоты ω_i . Соответствующие частоты для системы ЕМ4Н – 130, 521, 2083 и 8333 Гц, как в варианте с самолетом, так и в вертолетном варианте. Для системы ЭКВАТОР выбраны 25 частот из набора $77(2n - 1)$, $n = 1, \dots, 100$, отвечающих наилучшему соотношению сигнал – шум. Измерения во временной области состоят из значений производной магнитного поля $d\mathbf{B}/dt$, усредненных по фиксированным временным интервалам. Таким образом, вектор измерения равен

$$(11) \quad \mathbf{z}_t = a_1(d\mathbf{B}/dt), \dots, a_{14}(d\mathbf{B}/dt),$$

$$a_i = \sum_{k=k_i}^{k_{i+1}} \frac{d\mathbf{B}(t_k)/dt}{k_{i+1} - k_i}, \quad k_{i+1} \approx 1,62 \cdot k_i,$$

14 временных интервалов в диапазоне от 5 до 4420 мкс после выключения тока в петле выбираются по возможности равномерно в логарифмической шкале.

В общей форме уравнение измерений может быть записано в виде

$$(12) \quad \mathbf{z} = F(\mathbf{x}, \mathbf{M}, \mathbf{R}, h) + \mathbf{q},$$

где \mathbf{x} – вектор оцениваемых параметров; \mathbf{M} – вектор дипольного момента передатчика; \mathbf{R} – радиус-вектор взаимного расположения передатчика и приемника; h – высота полета; \mathbf{q} – случайный вектор шумов измерений, который моделируется белым шумом с ковариационной матрицей \mathbf{Q} , которую можно оценить при выполнении процедуры калибровки. Существенно нелинейная функция F описывает решение прямой задачи для заданного распределения удельных электрических сопротивлений [3].

Подходом к решению обратной задачи, т.е. оценки параметров по измерениям, был итерационный расширенный (обобщенный) фильтр Калмана [4]. В качестве модели динамической системы использовалась следующая:

$$(13) \quad \mathbf{x}_{i+1} = \mathbf{x}_i + \mathbf{l},$$

где \mathbf{l} – случайный вектор, который моделируется белым шумом с ковариационной матрицей \mathbf{L} и характеризует изменчивость

модели при переходе от одной точки измерений к другой. Задаются эмпирически.

7. Алгоритм обработки большого объема данных

Несмотря на существенное упрощение модели, объем вычислений, необходимых для обработки всего массива данных, остается очень большим. Одна итерация нелинейного фильтра Калмана на ПК с процессором Intel Core i7-13700H длится от 1 до 10 секунд. Для получения удовлетворительной точности модели, как правило, необходимо от 5 до 15 итераций. При этом часто реальные данные содержат несколько десятков тысяч точек.

Для того чтобы произвести моделирование всего объема данных за приемлемое время, необходимо применять алгоритмы параллельной обработки. В данной работе совместно применялись два подхода: ускорение одной итерации фильтра Калмана и разбиение массива данных на независимые компоненты (шардирование). Обработка данных производилась на shared-nothing кластере, состоящем из одного управляющего узла и 18 однопроцессорных вычислительных узлов, каждый из которых обладал 10–15 ядрами.

При оценивании параметров модели наиболее ресурсозатратным шагом является вычисление параметров матрицы Якоби функции прямой задачи. Для этого необходимо смоделировать вторичное поле среды столько раз, сколько параметров имеет модель (поскольку каждый параметр необходимо проварьировать). В данной работе эти вычисления проводились в параллельном режиме. Решение прямой задачи для каждого варьированного параметра выполнялось в отдельном потоке POSIX. Все потоки имели в качестве разделяемого ресурса исходные (до вариации) параметры модели и объект, вычисляющий быстрое преобразование Фурье свертки двух сигналов (последний шаг решения прямой задачи во временной области). Для синхронизации доступа к разделяемым ресурсам использовались мьютексы. Этот подход позволил одновременно задействовать все ядра процессора.

При обработке большого массива геофизической информации данные, полученные в разных вылетах, как правило, предполагают слабо зависимыми. В связи с этим при вычислениях их можно разбить на набор параллельных линий, каждую из которых можно обрабатывать независимо. В данной работе использовался подход, при котором управляющий узел кластера производит разбиение и распределяет линии по вычислительным узлам, приписывая узлу с наибольшей тактовой частотой процессора самую длинную линию. По окончании вычислений управляющий компьютер собирает результаты инверсии в один выходной файл.

Применение описанного подхода позволило ускорить обработку данных в 100–200 раз по сравнению с использованием одного ПК.

8. Результаты инверсии

Ниже показаны результаты инверсии данных, полученных после съемок вдоль одного и того же профиля в Норильском регионе разными системами (рис. 6).

На рис. 7 представлены результаты измерений аномалии магнитного поля Земли и результаты инверсии данных аэроэлектроразведки системой ЭКВАТОР. На среднем графике рис. 7 показана невязка, рассчитанная по формуле

$$(14) (\mathbf{z}_{\text{ИЗМ}} - \mathbf{z}_{\text{ВЫЧ}})^T \mathbf{Q}^{-1} (\mathbf{z}_{\text{ИЗМ}} - \mathbf{z}_{\text{ВЫЧ}}),$$

где $\mathbf{z}_{\text{ИЗМ}}$ соответствует вектору измерений, $\mathbf{z}_{\text{ВЫЧ}} = F(\mathbf{x}, \dots)$ – результат решения прямой задачи с учетом текущей оценки вектора параметров \mathbf{x} . В нижней части представлен вертикальный разрез, построенный по оценкам удельных электрических сопротивлений. В качестве исходных данных для этих оценок использовались измерения во временной (рис. 9) и частотной (рис. 10) областях [11]. Видно, что положительная магнитная аномалия амплитудой около 30 нТл пространственно совпадает с телом с относительно высоким удельным электрическим сопротивлением, залегающим на глубине 150–200 м (рис.7).



Рис. 6. Геологическая карта исследуемого региона и линия съемки (с востока на запад)

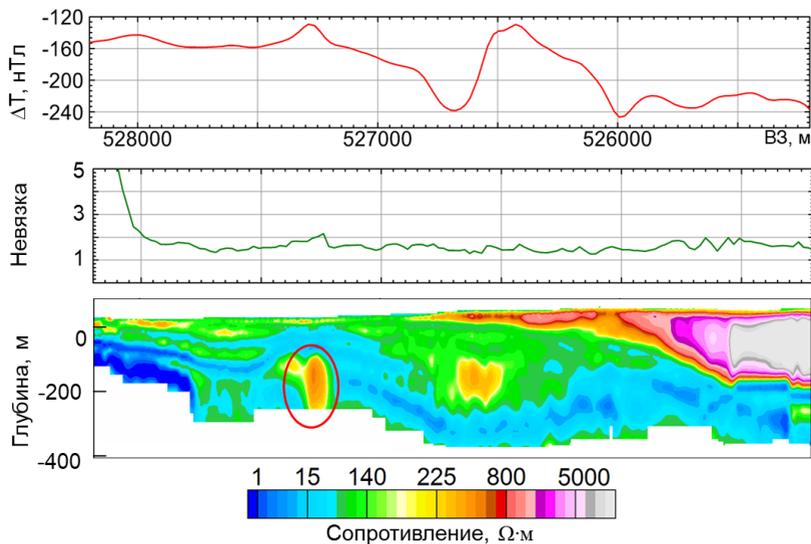


Рис. 7. Аномалия магнитного поля Земли, невязка и вертикальный разрез удельных электрических сопротивлений ($\Omega \cdot \text{м}$) по результатам комбинированной (в частотной и временной областях) инверсии

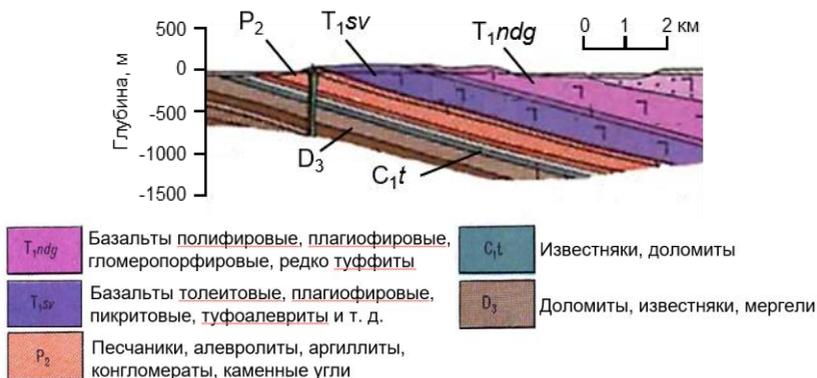


Рис. 8. Геологический разрез по данным бурения к северу от профиля съемки

Полученные структуры, представленные на рис. 7, соответствуют структурам, выявленным на геологическом разрезе в нескольких километрах севернее (рис. 8). Разрезы на рис. 7 и 8 имеют разную длину по горизонтали, но одинаковый коэффициент растяжения по вертикали, равный 2.

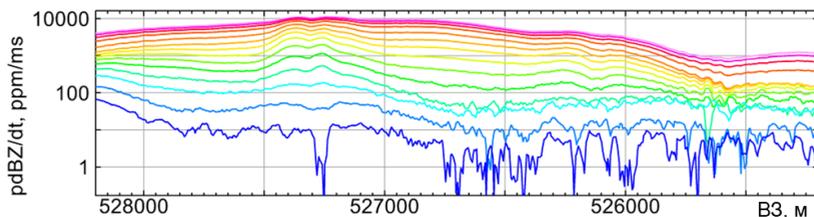


Рис. 9. Отклики во временной области

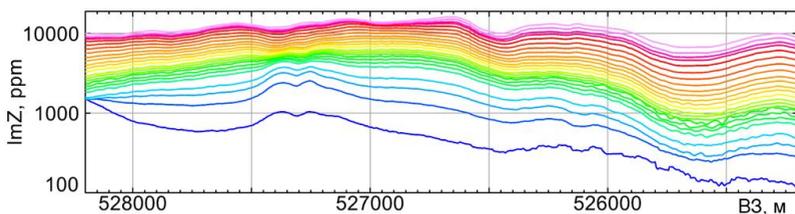


Рис.10. Отклики в частотной области

Рисунки 11–12 представляют результаты инверсии, где сверху показаны входные данные (отклики), в середине — невязка, а внизу — разрез удельных электрических сопротивлений.

На рис. 11 показаны результаты инверсии для самолетной конфигурации системы ЕМ4Н. Тело с высоким удельным сопротивлением, выделенное на рис. 7, на рис. 11 не видно. Глубинная часть профиля практически полностью отсутствует, а пространственное разрешение значительно хуже. Верхняя часть менее детализирована. Глубина исследования ниже из-за более высокой базовой частоты 130 Гц, в то время как у ЭКВАТОРа она составляет 77 Гц.

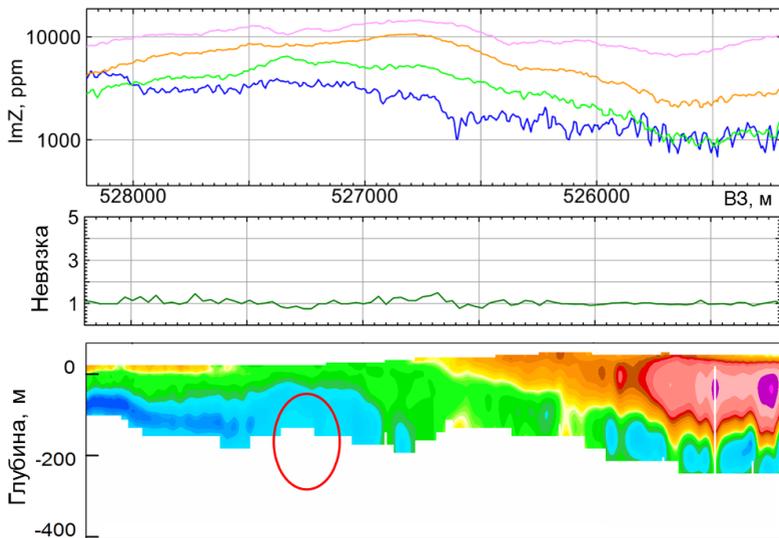


Рис. 11. Результаты инверсии самолетной системы EM4N

На рис. 12 показаны результаты инверсии, полученные для вертолетной конфигурации EM4N. Пространственное разрешение сравнимо с разрешением ЭКВАТОРа, видно верхнюю часть выделенного тела с высоким удельным сопротивлением. Но глубина исследования ниже из-за более высокой базовой частоты.

Рисунок 13 содержит условные обозначения ко всем кривым и разрезам на рис. 7, 9–12.

Также можно увидеть резкие контрасты удельных сопротивлений между верхними слоями – тонкий проводящий слой поверх изолятора. Вероятно, это можно объяснить эффектом вызванной поляризации [8], который возникает в условиях вечной мерзлоты. Опытный геофизик может увидеть это в правой части на графиках откликов во временной области (рис. 9).

Вертолетная система EM4N совершила полет в октябре 2023, при отрицательных температурах, система ЭКВАТОР – в сентябре 2015, а самолетная система EM4N – в августе 2012, обе при положительных температурах. Можно предположить, что полеты в разное время года соответствуют разной степени протайки в многолетнемерзлых породах.

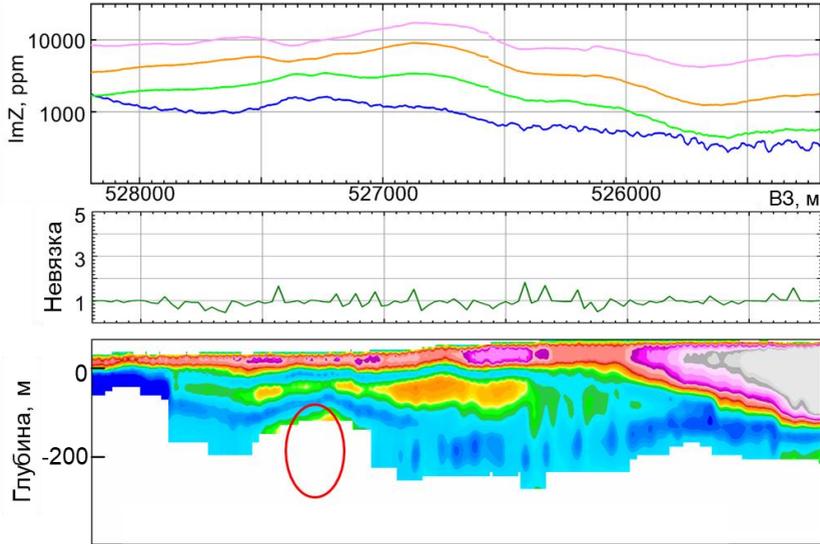


Рис. 12. Результаты инверсии данных вертолетной модификации EM4H

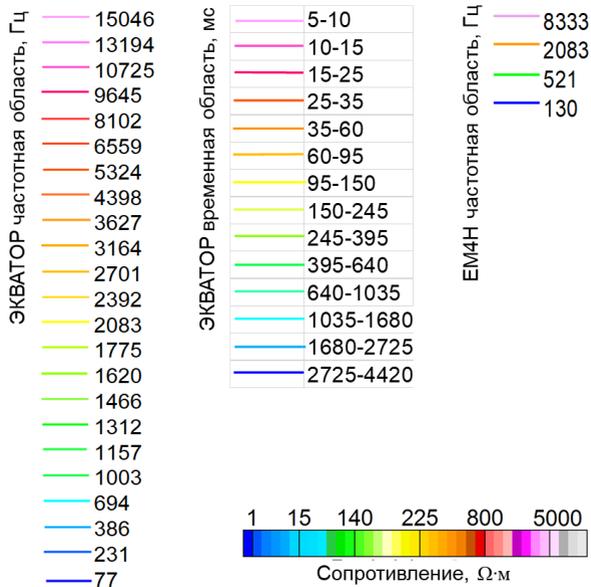


Рис. 13. Легенда сигналов и удельных сопротивлений

9. Выводы

Проведен анализ методов компенсации наведенной помехи. Описан алгоритм одномерной инверсии, пригодный для всех конфигураций электроразведочной системы ЕМ4Н и для системы ЭКВАТОР.

Показано, что наилучший результат компенсации дает подход, при котором учитывается перемещение приемника относительно источника поля. Это справедливо как для системы ЕМ4Н жестко закрепленной на фюзеляже самолета, так и для буксируемой системы, которая находится на значительном расстоянии от вертолета. Во втором случае наведенное поле на низкой частоте практически отсутствует, но становится существенным на высоких частотах.

По результатам инверсии электромагнитных данных для нескольких конфигураций аэроэлектроразведочной системы было продемонстрировано, что:

- Самое высокое пространственное разрешение и наибольшая глубина исследования соответствуют инверсии данных ЭКВАТОРа.
- Результаты для самолетной системы ЕМ4Н хорошо соответствуют геологическому строению профиля, но имеют низкую детальность.
- Результаты инверсии для вертолетной системы ЕМ4Н показывают сильный контраст сопротивлений верхних слоев. Это может быть связано с тем, что территория расположена в районе вечной мерзлоты, а сезонные различия в сборе данных привели к разному состоянию в верхней части разреза, что исказило результаты измерений.

Данные показали небольшое присутствие вызванной поляризации, влияние которой заметно в данных ЭКВАТОРа.

Требуется дальнейшее исследование причин количественных отличий в оценке сопротивлений верхней части разреза, полученных сопротивлений для буксируемого варианта системы ЕМ4Н.

Литература

1. ВОЛКОВИЦКИЙ А.К., КАРШАКОВ Е.В., ПОПОВИЧ В.В. *Низкочастотная индуктивная аэроэлектроразведочная система EM-4H* // Записки Горного института. – 2009. – Т. 183. – С. 224–227.
2. ВОЛКОВИЦКИЙ А.К., КАРШАКОВ Е.В., МОЙЛАНЕН Е.В. *Новая вертолетная электроразведочная система ЭКВА-ТОР для метода АМПП* // Приборы и системы разведочной геофизики. – 2010. – №02(32). – С. 27–29.
3. ЖДАНОВ М.С. *Электроразведка: Учебник для вузов.* – М.: Недра, 1986. – 316 с.
4. КАРШАКОВ Е.В., *Применение фильтра Калмана для решения обратных задач в аэроэлектроразведке* // EAGE Инженерная и рудная геофизика, 2018 г.
5. МОЙЛАНЕН Е.В. *Современные методы аэроэлектроразведки* // Физика Земли. – 2022. – №5. – С. 171–180.
6. ПАВЛОВ Б.В., ВОЛКОВИЦКИЙ А.К., КАРШАКОВ Е.В. *Низкочастотная электромагнитная система относительной навигации и ориентации* // Гироскопия и навигация. – 2010. – С. 3–15.
7. ТХОРЕНКО М.Ю., КАРШАКОВ Е.В., ПАВЛОВ Б.В. и др. *Алгоритм позиционирования подвижного объекта в низкочастотном электромагнитном поле* // Автоматика и телемеханика. – 2015. – №11. – С. 160–173.
8. ХЛЮСТОВ Д.К. *Моделирование эффекта индуктивно вызванной поляризации в частотных данных аэроэлектроразведки* // Управление большими системами. – 2025. – Вып. 114. – С. 108–121.
9. VARABANOVA L.P., VARABANOV O.O. *Effective solution of the problem of electromagnetic positioning based on two-axial radiator* // Journal of Mathematical Sciences. – 2021. – Vol. 255, No. 5. – P. 551–560.
10. HODGES G. *The power of frequency domain: When you should be using it* // Extended Abstracts of the 6th Int. AEM Conference & Exhibition, 2013. – 5 p.

11. KARSHAKOV E., MOILANEN E. *Combined interpretation of time domain and frequency domain data* // Proc. of 7th Int. Workshop on Airborne Electromagnetics, 2018.
12. LEGAULT J.M. *Airborne Electromagnetic Systems – State of the Art and Future Directions* // CSEG Recorder. – 2015. – Vol. 40, No. 6. – P. 38–49.
13. SMITH R. S. *Tracking the Transmitting-Receiving Offset in Fixed-Wing Transient EM Systems: Methodology and Application* // Exploration Geophysics. – 2001. – Vol. 32. – P.14–19.
14. TELFORD W., GELDART L., SHERIFF R. *Applied geophysics*. – Cambridge University Press, 1990.
15. VOVENKO T., MOILANEN E., VOLKOVITSKII A. et al. *New Abilities of Quadrature EM Systems* // Papers of the 13th SAGA Biennial and 6th Int. AEM Conf., Mpumalanga, South Africa, 2013. – P. 1–4.

COMPENSATION OF INTERFERENCE IN AIRBORNE ELECTROMAGNETIC SYSTEMS AND MODELING OF THE GEOLOGICAL ENVIRONMENT BY THE INVERSION METHOD IN THE PROCESSING OF AIRBORNE ELECTRICAL SURVEY DATA

Leo Vlasov, V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of RAS, Moscow, Engineer (leo_vlassov@yahoo.com).

Dmitry Kaplun, V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of RAS, Moscow, Engineer (dvkaplun@yandex.ru).

Ekaterina Tretyakova, V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of RAS, Moscow, Junior Researcher (ekaterina_tretikova@mail.ru).

Dmitrii Khliustov, V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of RAS, Moscow, Postgraduate Student (hlustov.d@gmail.com).

Abstract: Various methods of induced interference compensation for the EQUATOR system and several modifications of the EM4H onboard electromagnetic system were compared. Two modifications of the EM4H were investigated: the system with a transmitter loop mounted on the fuselage of the An-3 aircraft and the system with a loop towed by the Eurocopter AS350B3 helicopter. Two methods of modeling transmitter signal interference are considered: in the form of a stationary systematic component of measurements and in the form of a stationary field vector rigidly

*Программы и системы моделирования объектов,
средств и систем управления*

connected to the transmitter. To implement the second approach, two additional dipoles are used in EM4N and EQUATOR to determine the relative positions of the transmitter and receiver. The analysis was performed for data obtained during the flights at high altitudes with no response from the ground. The following statistical parameters of signals remaining after interference compensation were analyzed: standard deviation and the difference between the minimum and maximum values. It is shown that the best compensation result is obtained by an approach that takes into account the movement of the receiver relative to the field source (transmitter). The next step was to provide interpretation of data with the objective of estimating important geophysical characteristics. For each of studied systems Kalman filter algorithm was applied providing resistivity maps, which have been compared with respect to resolution.

Keywords: compensation, transmitter, receiver, magnetic dipole, airborne electromagnetics, one dimensional model, Kalman filter.

УДК 527.62+ 519.24

ББК 30в6

*Статья представлена к публикации
членом редакционной коллегии А.И. Алчиновым.*

Поступила в редакцию 24.02.2025.

Опубликована 31.07.2025.