

А-ЛМЛС.

Исходные уравнения для данной ЛМЛС - (14), (20), (26) и (29). Угол α направления на объект можно определить, имея три ненулевых производных:

$$\alpha = \pm \arccos \sqrt{\frac{3 + 10\theta \pm \sqrt{9 + 88\theta}}{2(25\theta - 7)}} \quad (43)$$

где $\theta = \frac{H'_2 H''_2}{5(H''_2)^2}$. Если $H'_2 = 0$, а $H''_2 \neq 0$, то $\alpha = \alpha_1$; если $H''_2 = 0$, а $H'''_2 \neq 0$, то $\alpha = \alpha_3$; наконец, если $H'''_2 = 0$, а $H''''_2 \neq 0$ (последнее нужно для уверенности в том, что нулевое значение H'''_2 обусловлено тригонометрическим фактором), то $\alpha = \alpha_5$ (см. табл.5).

Третья задача магнитолокации на плоскости (определение дальности) решается с помощью тех же формул (33), которые применялись в линейной локации. Точно так же для четвертой задачи (определение M_2) можно пользоваться формулами (35).

Вообще говоря, задачи локации на плоскости отличаются от задач линейной локации только необходимостью определить еще и α , все действия после того, как угол α определен, практически идентичны для обоих видов локации. Можно было бы ограничиться в этом параграфе только анализом поиска α , но первый же пример (А-ЛМЛС) показывает, что ситуация не так проста. Уравнение (43) дает четыре решения, и если нет никакой дополнительной информации, то определить истинное направление на объект по первым трем производным невозможно. Кстати, аналогичная неопределенность имеет место и в тех ситуациях, когда $H'_2 = 0$, $H''_2 = 0$ или $H'''_2 = 0$ (число решений в этих случаях составляет 2, 4 и 6, соответственно). Ситуация может проясниться, если кроме первых трех производных есть еще и ненулевая четвертая производная. Тогда составляется еще одно уравнение:

$$(5x-1)(63x^2-31x+1) = cx(3-7x)^2 \quad (44)$$

где $x = \cos^2 \alpha$, $c = \frac{5}{3} \frac{H'_2 H''_2}{(H''_2)^2}$, и отыскиваются его положительные дейст-

вительные корни, по которым уже определяются $\cos \alpha$. Однако полностью исключить неопределенность не удастся таким путем даже если (44) имеет только одно решение, т.к. и (43), и (44) позволяют однозначно получить только $\cos^2 \alpha$, а каждый такой корень дает четыре направления, связанные зеркальной симметрией относительно осей X и Y. Иногда уменьшить еще в 2 раза неопределенность помогает учет знаков производных, приведенных в первых четырех столбцах таблицы 7. Однако недостаточность возможностей кодировки (8 комбинаций знаков на 10 секторов) не обеспечивает 100%-ной уверенности в правильности определения α . Еще одним добавочным источником информации является тот факт, что намагниченность объекта коррелирует с МПЗ (в том случае, когда объект не имеет собственного момента, превышающего индуцированный), т.е. знак ее определен (а значит, в таблице 7 минус и плюс различимы, т.е. число комбинаций кодов равно $8 \times 2 = 16$)

Таблица 7. Знаки производных H_z при различных α .

Интервал углов	H'_z	H''_z	H'''_z	H^{IV}_z	$\frac{\partial H_z}{\partial y}$	$\frac{\partial^2 H_z}{\partial x \partial y}$
0-49°	-	+	-	+	-	+
49°-63,4°	-	+	+	+	-	+
63,4°-66,2°	-	-	+	+	-	+
66,2°-78,6°	-	-	+	-	-	+
78,6°-90°	-	-	+	+	-	+
90°-101,4°	+	-	-	+	-	-
101,4°-113,8°	+	-	-	-	-	-
113,8°-116,6°	+	-	-	+	-	-
116,6°-131°	+	+	-	+	-	-
131°-180°	+	+	+	+	-	-

Точность определения угла α (без учета неоднозначности определения сектора) зависит от самого угла α , поэтому простого аналитического выражения для критерия работоспособности локатора по второй задаче получить не удастся. Машинный расчет диаграммы направленности А-ЛМЛС приведен в Приложении А.

В-ЛМЛС.

Углы α и φ в уравнениях (16), (22), (27) и (29) системы для В-ЛМЛС связаны сложными тригонометрическими соотношениями, и чтобы получить более или менее надежные решения второй задачи (не говоря уж о более сложных задачах), необходимо, чтобы все четыре производных измерялись с высокой степенью надежности. Даже в этом случае придется решать систему из двух уравнений, где после исключения $\operatorname{tg} \varphi$ и радикалов получается алгебраическое уравнение относительно $\operatorname{tg} \alpha$, степень которого выражается двузначным числом. Очевидно, что В-ЛМЛС не является оптимальным типом локатора. Абсолютно такой же вывод следует и для С-ЛМЛС.

Д-ЛМЛС.

Вторая задача для Д-ЛМЛС гораздо легче, чем для локатора типа А, т.к. вместо третьей производной по X здесь достаточно знания обеих первых производных, и только их:

$$\alpha = \operatorname{arctg} \left(\frac{\partial H_z / \partial y}{\partial H_z / \partial x} \right) \quad (45)$$

Третья задача (определение Γ) требует знания какой-либо производной иного порядка. В данном случае мы имеем две вторых производных, которые одновременно в нуль обратиться не могут. Значит, третья и четвертая задачи легко решаются в рамках знания первых и вторых производных.

Е-ЛМЛС.

Вновь α и φ связаны сложными тригонометрическими соотношениями в уравнениях (16), (17), (22) и (23), составляющих исход-

ную систему. Однако здесь нет необходимости конструировать каждое тригонометрическое уравнение из производных разного порядка:

$$\frac{\frac{\partial H_x}{\partial x}}{2 \frac{\partial H_x}{\partial y}} = \frac{(3 - \operatorname{tg}^2 \alpha) + 2 \operatorname{tg} \alpha \operatorname{tg} \varphi}{(3 \operatorname{tg}^2 \alpha - 1) \operatorname{tg} \varphi + 8 \operatorname{tg} \alpha} \quad (46)$$

$$\frac{\frac{\partial^2 H_x}{\partial x^2}}{\frac{\partial^2 H_x}{\partial x \partial y}} = \frac{\operatorname{tg} \alpha \operatorname{tg} \varphi (5 - \operatorname{tg}^2 \alpha) - 6 (\operatorname{tg}^2 \alpha - 1)}{\operatorname{tg} \varphi (5 \operatorname{tg}^2 \alpha - 1) + 2 \operatorname{tg} \alpha (5 - \operatorname{tg}^2 \alpha)} \quad (47)$$

Тем не менее, исключение $\operatorname{tg} \varphi$ из (46) и (47) приводит к полному уравнению пятой степени относительно $\operatorname{tg} \alpha$. Таким образом, ситуация здесь не намного лучше, чем для В- и С-ЛМЛС, хотя в принципе приближенное решение (содержащее до пяти действительных корней) получить машинным способом несложно (и не так уж долго). Аналогично обстоит дело и с F-ЛМЛС. G- и K-ЛМЛС фактически являются аддитивной суммой A-ЛМЛС и В- (или С-) ЛМЛС, так что все их особенности действуют и здесь. I-ЛМЛС с точки зрения расчета аналогична E- или F-ЛМЛС с той лишь разницей, что здесь все производные относятся к координате X, т.е. определяются точнее, чем $\frac{\partial}{\partial y}$. M-ЛМЛС отличается от I-ЛМЛС тем, что степень тригонометрического уравнения для определения α удастся снизить до четырех, что позволяет обойтись более быстрым аналитическим решением уравнения. В L-, N-, P- и Q-ЛМЛС наличие Z-канал "спасает" задачу угловой локации, сводя ее решение к тому, что получено для A- и D-ЛМЛС.

Теперь вернемся к тем одномерным задачам, которые обсуждались в начале предыдущего параграфа. В варианте на плоскости, в которой расположена произвольная (но известная) линия перемещения объектов, к уравнениям, описывающим измеряемые поля и производные, следует добав^Иить уравнение линии объектов. Наличие этого дополнительного уравнения в ряде случаев заметно облегчает решение наиболее трудной второй задачи плоской локации, особенно там, где Z-компонента не измеряется. Однако если линия объектов описывается формулой, где

нельзя выразить через α простым (хотя бы и приближенным) соотношением, это облегчение оказывается чисто символическим.

Интересно отметить, что при малых α точность определения этого угла довольно плохая (для всех типов ЛМЛС, кроме $-$, $-$ и $0-$). Этот минус, однако, легко обратить в плюс, поскольку такой локатор будет одинаково работоспособен для одномерных задач, где линия объектов имеет произвольную форму, но вся располагается в пределах сектора $|\alpha| < \alpha_{\text{пр}}$, где $\alpha_{\text{пр}}$ — тот угол, за пределами которого уже начинается надежная локация по α . Таким образом, алгоритм простейшей одномерной (линейной) локации оказывается применим и для более широкого класса траекторий.

2.7. О выборе оптимальной структуры и типа ЛМЛС.

В таблице 6 приведены критерии работоспособности ЛМЛС разных типов для четырех задач линейной локации. Аналогичную таблицу можно было бы составить и для соответствующих задач магнитолокации на плоскости. Каждый тип ЛМЛС может иметь любую из пяти структур, перечисленных в таблице 3. Поскольку сложность ЛМЛС связана с числом каналов измерения, то полезно оценить, сколько нужно таких каналов для того, чтобы ЛМЛС могла решить конкретную задачу локации (при нулевой избыточности).

Поскольку критерии работоспособности ЛМЛС в таблице 6 выражались в необходимости измерять с конкретной точностью производные поля нужного порядка, то полезно и данные о минимальном числе каналов связать с конкретными производными. Эти данные сведены в таблицы 8 и 9. Видно, что при работе по задачам высокого ранга (третьей и четвертой) ЛМЛС уже представляет собой комплекс с двузначным числом каналов; излишние (не нужные для решаемой задачи) возможности ЛМЛС оплачиваются довольно высокой ценой увеличения числа каналов (а следовательно, и вероятности отказа какого-нибудь

Таблица 8. Минимальное количество измерительных каналов однокомпонентных одномерных ЛМДС*, необходимое для измерения $\frac{\partial^n H}{\partial x^n}$

Вид измерений в точке \ n	1	2	3	4
H	2	3	4	5
H'	1	2	3	4
H+H'	2	2	4	6
H' + H''	2	2	4	4
H+H'+H''	3	3	6	6

Таблица 9. Минимальное количество измерительных каналов однокомпонентных двумерных ЛМДС*, необходимое для измерения $\frac{\partial^n H}{\partial x^n}$ и $\frac{\partial^n H}{\partial x^{n-1} \partial y}$ (в скобках).

Вид измерений в точке \ n	1	2	3	4
H, $\frac{\partial H}{\partial y}$	4(2)	6(4)	8(6)	10(8)
$\frac{\partial H}{\partial x}, \frac{\partial H}{\partial y}$	2(2)	4(4)	6(6)	8(8)
H, $\frac{\partial H}{\partial x}, \frac{\partial H}{\partial y}$	3(3)	6(6)	6(9)	9(12)
$\frac{\partial H}{\partial x}, \frac{\partial H}{\partial y}, \frac{\partial^2 H}{\partial x^2}$	3(3)	3(6)	6(9)	6(12)
H, $\frac{\partial H}{\partial x}, \frac{\partial H}{\partial y}, \frac{\partial^2 H}{\partial x^2}$	4(4)	4(8)	8(12)	8(16)

*Для двухкомпонентных ЛМДС число необходимых каналов удваивается (при условии, что обе компоненты представлены в измерительном комплексе равноправно), для трехкомпонентных – утраивается

из них). С другой стороны, необходимо обеспечить хотя бы минимальную избыточность ЛМЛС применительно к решаемой задаче, т.к. это намного повышает работоспособность локатора и уменьшает риск отказа локатора в целом. Иначе говоря, выбор типа и структуры ЛМЛС должны быть тщательно согласованы с видом решаемой задачи и дополнительными условиями и источниками информации. Пример такого выбора приводится ниже.

Допустим, поставлена задача контроля перемещения тяжелой техники по автодороге. Дорога идет с севера на юг, минимальное допустимое приближение к дороге – 200 м., объект имеет в поле МПЗ магнитный момент $\sim 1000 \text{ А.м}^2$. "Контроль" означает знание количества единиц техники и направления ее передвижения.

В общем случае характер обстановки на дороге может быть различным: объекты могут двигаться и поодиночке, и большими колоннами. Решать задачу поштучной локации множественных диполей практически невозможно, т.к. даже для двух диполей задача достаточно сложна, а здесь их может быть и более десятка. Однако можно воспользоваться тем, что вектор магнитного момента транспортного средства практически совпадает с продольной осью, параллельной направлению движения. А поскольку вектор МПЗ параллелен дороге, то при близком расположении объектов (колонна) их магнитные моменты будут просто суммироваться, т.е. для удаленного локатора колонна из N объектов каждый из которых характеризуется магнитным моментом M , будет представлять собой один диполь с моментом NM , расположенный в "центре масс" колонны. Итак, уточненная задача выглядит так: нужно фиксировать величину появляющихся в поле зрения магнитных диполей и направление их перемещения по заданной дороге. В нашей терминологии это двумерная задача идентификации объекта со вспомогательным уравнением траектории (дороги).

Попытаемся сначала построить ЛМЛС с минимальным количеством каналов при максимальной чувствительности по задаче идентифика-

ции. Анализируя таблицу 6, можно установить, что наиболее "мягкий" критерий $|H''| > 8\sigma_H$ одинаков для всех однокоординатных одномерных ЛМЛС (и для других ЛМЛС тоже, но там число каналов в 2-3 раза больше). Наличие критических углов, где критерий (36а) заменяется более жесткими соотношениями, в принципе нас может не смущать, поскольку объекты ни возникать, ни исчезать на дороге не могут, а значит, в тот или иной промежуток времени они минуют некоторый участок дороги на который (и только на него) можно обращать при докации особое внимание.

Оценим, какой сигнал будет на каналах измерения второй производной по X при нахождении объекта на кратчайшем расстоянии от ЛМЛС, когда $\varphi = 90^\circ$:

$$\frac{\partial^2 H_z}{\partial x^2} = - \frac{3M_z}{4\pi r^5} (4\cos^2 \alpha - \sin^2 \alpha) \quad (20^*)$$

$$\frac{\partial^2 H_x}{\partial x^2} = - \frac{M_{xy}}{2\pi r^5} \sin \alpha (5\cos^2 \alpha - \sin^2 \alpha) \quad (22^*)$$

$$\frac{\partial^2 H_y}{\partial x^2} = \frac{M_{xy}}{\pi r^5} 3\cos \alpha \cdot \cos 2\alpha \quad (24^*)$$

Если $M_z \geq M_{xy}$, то бесспорное преимущество имеет А-ЛМЛС. Однако чаще всего подвижные объекты сильно вытянуты (и намагничены) в направлении движения, при этом вертикальная компонента диполя в 3-5 раз меньше горизонтальной, так что наш выбор ограничен В- и С-ЛМЛС. Анализируя тригонометрическую часть формул (22*) и (24*), получим следующие оптимальные ориентации:

$$\frac{\pi r^5}{M_{xy}} \left| \frac{\partial^2 H_x}{\partial x^2} \right|_{\max} = \begin{cases} 0,5 & \text{при } \alpha = 0 \\ 0,87 & \text{при } \alpha = \pm \arccos \sqrt{\frac{13}{18}} \end{cases}$$

$$\frac{\pi r^5}{M_{xy}} \left| \frac{\partial^2 H_y}{\partial x^2} \right|_{\max} = \begin{cases} 3 & \text{при } \alpha = 0 \\ 0,81 & \text{при } \alpha = \pm \arccos \frac{1}{6} \end{cases}$$

Очевидное преимущество для нашей задачи имеет С-ЛМЛС при ориентации $\alpha = 0$ (см. рис.3). Оценим теперь, каков же будет сигнал от объекта

дорога

С-ЛМЛС

Рис.3. Оптимальное расположение С-ЛМЛС для задачи контроля за дорогой.

в этом положении*:

$$\frac{\partial^2 H_y}{\partial x^2} \equiv \frac{3}{\pi} \cdot \frac{10^3 \text{ А} \cdot \text{м}^2}{98 \cdot 10^{10} \text{ м}^5} = 3 \cdot 10^{-9} \text{ А/м}^3 = 1,2 \cdot 10^{-15} \text{ Тл/м}^2$$

Возвратившись теперь к таблице 3, выберем структуру ЛМЛС, наиболее чувствительную ко второй производной. Это – структура 6(Н), для которой $\delta_{\vec{H}} = 0,0008 \delta_H$. Структура, кстати, достаточно надежная, с двукратной избыточностью (см. табл. 8). В полном составе данная ЛМЛС способна обеспечить выполнение критерия работоспособности (36а) при чувствительности магнитометрического канала:

$$\delta_H \leq \frac{1,2 \cdot 10^{-15}}{0,0008 \cdot 8} = 1,9 \cdot 10^{-13} \text{ Тл}$$

Напомним, что критерий (32а) соответствует 50%-ной точности определения магнитного момента, т.е. различению одного и двух объектов. Для одиночных объектов (не колонн) задача упрощается, т.к. критерий локации (34а) в четыре раза "мягче", чем (36а).

Конкретная ситуация данной задачи позволяет воспользоваться еще одним упрощением. Диполи ориентированы вдоль МПЗ, поэтому векторная их сумма, измеряемая магнитометрическими каналами, фактически является арифметической суммой. Если теперь любым удаленным (от дороги) прибором отслеживать МПЗ и его временные вариации и вводить эти данные в счетно-аналитическое устройство ЛМЛС, то можно снизить порядок производных, используемых при расчете, на единицу. В нашем случае это в 4 раза снижает требования к чувствительности магнитометрического канала. Кстати, если вместо 6(Н)-структуры использовать 3(Н+Н') (где всего три точки измерения, т.е. три сосуда Дьюара), то потеря точности составит ~25%.

В настоящее время реальные магнитометры на основе сквидов обеспечивают чувствительность $(2-4) \cdot 10^{-14} \text{ Тл/Гц}^{1/2}$ (предельные ве-

*Линейный размер ЛМЛС принимаем равным 100 м, так что реальное расстояние от центра ЛМЛС до дороги составит не 200, а 250 м.

личины, достигнутые в мире, на полтора порядка лучше), т.е. поставленная в примере задача как будто вполне разрешима уже на существующем оборудовании. Остается теперь выяснить, как изменится ситуация, если учесть помехи.

2.8. "Подводные камни" магнитолокации

До сих пор молчаливо предполагалось, что сквид с антенной нужной конфигурации может измерить любую требуемую характеристику магнитного поля искомого диполя, лишь бы рабочий сигнал был замечен на фоне собственных шумов сквида и первых каскадов измерительной системы. Однако реальная ситуация существенно отличается от этой идеализированной картины и пренебрежение некоторыми факторами, ухудшающими условия работы лоатора, не раз уже подводило слишком оптимистичных экспериментаторов. Среди этих факторов есть и внешние, не зависящие от лоатрра, и внутренние, определяемые свойствами тех или иных узлов лоатора.

Оценочный анализ величины шумового сигнала проведен в Приложении Д, результаты этого анализа сведены в таблицу 10. Каждый из источников помех по разному сказывается на измерениях в зависимости и от схемы ЛМЛС, и от условий, в которых придется ей работать. Чтобы привести все эти цифры к реальным тактико-техническим характеристикам лоатора (а конкретно - к предельной дальности обнаружения и локации), на рис. 4-5 приведены значения сигнала, генерируемого разными объектами в датчиках ЛМЛС в зависимости от расстояния до объекта.

А теперь вернемся к задаче слежения за дорогой и, уточнив необходимые условия, посмотрим, на что мы можем рассчитывать. Шестиканальный магнитометр, выбранный нами, состоит из 6 сосудов, в каждом из которых размещен сквид-датчик с чувствительностью по полю 10^{-14} Тл. Условия на местности таковы: лето, густой лес на глинистом