

1. Магнитное поле Земли. И на Земле, и в приземном пространстве МПЗ вездесущее и довольно значительно ($\sim 4-5 \cdot 10^{-5}$ Тл). Пространственные вариации МПЗ, обусловленные неодинаковостью магнитных свойств пород, имеют горизонтальный градиент $(0,5-5) \cdot 10^{-11}$ Тл/м. Вертикальный градиент МПЗ в средних широтах равен $2,5 \cdot 10^{-11}$ Тл/м. Колебания МПЗ во времени, обусловленные прежде всего атмосферными явлениями, захватывают весь частотный диапазон от 10^{-4} до 10 Гц, интересный с точки зрения локации, при этом амплитудные значения вариаций в полосе 0,01-1 Гц составляют $5 \cdot 10^{-10}$ - $1,5 \cdot 10^{-8}$ Тл [3]. Соответствующие вариации в градиентометрических каналах составляют $5 \cdot 10^{-16}$ - $1,5 \cdot 10^{-14}$ Тл/м.

Если положить, что масштаб приземных атмосферных явлений, определяемый линейными размерами облаков, имеет величину 10^3 - 10^4 м, то можно оценить амплитуду вариаций горизонтального градиента горизонтальной компоненты МПЗ, равную $5 \cdot 10^{-14}$ - $1,5 \cdot 10^{-11}$ Тл/м. Верхнее значение соответствует мелкомасштабным (~ 1 км) облакам со значительным вертикальным переносом заряда при скорости ветра ≥ 10 м/с; нижнее значение - крупномасштабным (~ 10 км) облакам при скорости ветра ≤ 1 м/с. Аналогично вычисляется амплитуда вариаций второй производной поля по координате: $5 \cdot 10^{-18}$ - $1,5 \cdot 10^{-14}$ Тл/м².

Очевидно, однокоординатный магнитометр будет отслеживать вариации МПЗ полностью, т.е. на уровне $5 \cdot 10^{-10}$ - $1,5 \cdot 10^{-8}$ Тл. Трехкоординатный прибор по каждой из координат будет измерять такие же вариации. Увеличение числа измерительных точек позволяет повысить точность т.к. теперь можно вычислить градиент поля и "убрать" составляющую МПЗ. В предположении, что рабочий полевой сигнал в канале ЛМЛС, наиболее удаленном от лоцируемого диполя, равен нулю, можно при базе $L=100$ м уменьшить ошибку поля до $5 \cdot 10^{-16}$ - $1,5 \cdot 10^{-13}$ Тл.

Аналогично определяется шумовой сигнал в градиентометрах.

2. Ферромагнитные массы. Все неподвижные ферромагнитные массы в магнитном поле Земли намагничены и, значит, представляют собой

объекты, обладающие наведенным дипольным моментом. Разделить сигналы от этих диполей и от искомого подвижного объекта в принципе можно было бы без особых трудностей, если МЛС предварительно "запомнит" распределение магнитных полей с учетом всего неподвижного железа. Таким образом, задача сигнализации о появлении постороннего объекта остается разрешимой, хотя и при измененной чувствительности. Что же касается задач локации, то в общем случае произвольного расположения больших ферромагнитных масс ошибка локации оказывается недопустимо большой (вплоть до противоположного направления на объект), т.к. влияние постороннего железа на величину поля и на величину каждой из его производных очень разнообразно по величине (и по знаку) и зависит от конфигурации и расположения элементов ферромагнитного окружения.

Если ограничиться первой задачей магнитолокации (обнаружение объекта), то в данном случае надо определить величину искажения поля, могущего дать ложный сигнал о наличии объекта в поле зрения локатора. Источником этого переменного во времени искажения, очевидно, может быть только магнитное поле Земли и температурные вариации магнитных свойств ферромагнитного окружения. Будем считать, что искажение однородного поля ферромагнитным окружением имеет величину $\sim 1\%$ (в районе размещения измерителя). Тогда сигнал от вариаций МПЗ, обсуждавшийся выше, в действительности в разных точках может изменяться на 1% от его абсолютной величины, т.е. для однокомпонентного магнитометра этот разброс, например, составит $5 \cdot 10^{-12} - 1,5 \cdot 10^{-10}$ Тл. Однако эта неодинаковость вариаций МПЗ в разных каналах может быть снижена при расчете на $1,5-2$ порядка с помощью соответствующих коэффициентов, поскольку она определяется статикой ферромагнитного окружения.

Температурные вариации магнитных свойств ферромагнитного окружения можно оценить из следующих соображений. Для обитаемых зданий, суточные колебания температуры могут составлять $3-5^\circ$ (для необитаемых они в ~ 3 раза выше), т.е. при периодичности проверки нуля $1,5$ минуты уход температуры не превысит $0,01^\circ$, это соответствует изменению M

железа на $3 \cdot 10^{-3}\%$ и почти такому же относительному изменению наведенного дипольного момента, а значит, и поля, создаваемого этим диполем в заданной точке. И если исходное поле от наведенного диполя составляет $4 \cdot 10^{-5} \text{ Тл} \times 0,01 = 4 \cdot 10^{-7} \text{ Тл}$, то температурные вариации дадут уход сигнала $\sim 1,2 \cdot 10^{-11} \text{ Тл}$ за 1,5 минуты. Однако, такой уход в принципе легко учитывается, т.к. он явно однонаправлен.

Неучитываемые изменения поля возникают из-за нагрева тонколистового железа солнечным излучением. При переменной облачности скорость нагрева или охлаждения железа кровельного, например, может достичь 10 град/сек. Наведенный магнитный момент крыши одноэтажного дома площадью $\sim 150 \text{ м}^2$, например, составляет $\sim 100 \text{ А} \cdot \text{м}^2$. Тогда на расстоянии 50 м от дома магнитное поле его крыши равно $\frac{100}{4\pi \cdot 50^3} = 3 \cdot 10^{-5} \text{ А/м} = 4 \cdot 10^{-11} \text{ Тл}$ и амплитуда изменения этого поля, соответствующая разности температур остывшего и нагретого железа в 30° , равна $3 \cdot 10^{-13} \text{ Тл}$. При базе ЛМЛС $\sim 100 \text{ м}$ различие в температурном сигнале от разных измерительных точек, очевидно, имеет такую же величину.

Градиентометрические измерения в условиях ферромагнитного окружения даже по первой задаче довольно непросты. Хотя вариации градиента МПЗ здесь уже не являются определяющими, исходная картина пространственного распределения градиентов характеризуется величинами $10^{-6} - 10^{-8} \text{ Тл/м}$ для близких маленьких железок и $10^{-10} - 10^{-12} \text{ Тл/м}$ — для удаленных массивных объектов типа зданий. Фиксировать (и впоследствии учитывать при расчете) эти величины можно с точностью $10^{-3}\%$, это даст для близких помех $10^{-11} - 10^{-13} \text{ Тл/м}$, для далеких $10^{-15} - 10^{-17} \text{ Тл/м}$. Температурную неоднородность (например, из-за солнечного нагрева) и соответствующий сигнал помехи можно оценить в 10^{-14} Тл/м для крыши, и в $\sim 10^{-11} \text{ Тл/м}$ — для близких мелких объектов с колебаниями температуры в $1 - 3^\circ$.

Особый класс ферромагнитного окружения представляет собственное оборудование магнитолокабраз. Если ЛМЛС установлена внутри не-

коего транспортируемого объекта, то неизбежное ферромагнитное окружение можно обустроить особым образом, добиваясь в некоторых случаях не понижения (экранирование), а повышения чувствительности. В частности, речь может идти об использовании части железа, окружающего ЛМЛС, в качестве концентратора магнитного потока. Использование "теплых" ферромагнитных элементов настройки и регулировки диаграммы чувствительности каждой из измерительных точек ЛМЛС, безусловно, облегчает проблему компенсации помех от окружения неконтролируемыми ферромагнитными массами и, по оценкам, в 2-3 раза позволяет уменьшить их влияние.

Если одновременно с градиентом поля измеряется и само поле, то температурные вариации градиента можно учесть при расчете с точностью $\sim 3 \cdot 10^{-2}$, т.е. снизить ошибку на 1,5 порядка. Увеличение числа измерительных каналов на точность практически не влияет, т.к. источники помех практически не коррелированы и, как правило, короткодействующие, т.е. каждый из них дает сигнал только в ближайших к нему измерительных каналах.

3. Индустриальные помехи. Не рассматривая здесь помехи на промышленной частоте (они опасны, но лишь при высоком уровне, когда скорость изменения поля превысит предельно допустимую, обусловленную быстродействием цепей обратной связи), ограничимся только анализом влияния токов заземления электроустановок и транспортными помехами. Измерения показывают, что среднеквадратичное магнитное поле в городских условиях составляет $\sim 2 \cdot 10^{-7}$ Тл. Градиент этого шумового поля оценивается в $\sim 5 \cdot 10^{-11}$ Тл/м, причем большая его часть попадает в наш рабочий частотный диапазон. Указанные числа и дают предельные возможности магнитолкации в городе для одноточечных магнитометров и градиентометров, соответственно.

На удалении город можно представить как систему хаотически расположенных и ориентированных диполей переменной величины. И раз-

мер токовых петель, образующих эти диполи, и величину токов в них нетрудно оценить. Например, трамвай при расстоянии до питающей подстанции в 3 км может образовать диполь с максимальным моментом $3000 \times 5 \times 20 \text{ А} = 3 \cdot 10^5 \text{ А} \cdot \text{м}^2$. Повидимому, это – наибольший момент из всех, которые могут возникнуть в городе. Что касается бытового и торгового электрооборудования, то здесь от каждого устройства с неисправной изоляцией можно ожидать возникновения тока утечки $0,1 - 1 \text{ А}$ при площади токовой петли $\sim 100 - 1000 \text{ м}^2$, т.е. дипольный момент в $10 - 10^4 \text{ А} \cdot \text{м}^2$. Данные рисунка 4 позволяют утверждать, что магнитометру городской шум не мешает ($H \sim 10^{-14} \text{ Тл}$) уже на расстоянии $\sim 1 \text{ км}$ для населенных пунктов без трамваев и на расстоянии 8–10 км от города с электрифицированным транспортом (включая метрополитен). Для градиентметрических приборов это расстояние несколько меньше. Использование N -точечной ЛМЛС позволяет снизить шум города еще на полтора порядка.

4. Помехи от собственной электро- и радиоаппаратуры. Если при монтаже и размещении измерительной электро- и радиоаппаратуры соблюдены элементарные правила, исключающие электромагнитное "загрязнение" окружающего пространства и проникновение этого "загрязнения" в цепь входных, наиболее чувствительных каскадов магнитометра, то никаких наводок и паразитных сигналов не возникает. Специфика сквид-магнитометрических устройств вызывает одно специфическое требование: корпуса электро- и радиоаппаратуры, питаемой от сети переменного тока, нельзя заземлять. И вообще использовать заземление как нулевой провод нельзя. Причина ясна: малейшие утечки (в том числе и неизбежные утечки емкостного типа), выпрямленные в выпаратуре и замыкающиеся через заземление, могут образовать замкнутый контур тока весьма причудливой формы и неконтролируемых размеров, причем антенна сквид-магнитометрического устройства наверняка окажется если не внутри, то во всяком случае в пределах радиуса воздействия этого контура.

Названное требование (запрет заземления корпусов) дает хороший результат для низкочастотной аппаратуры. Однако для защиты от

радиоизлучения аппаратуры связи этого недостаточно, работа КВ-радиостанции (даже малой мощности) в пределах 10-100 м от ЛМЛС дает паразитный сигнал, соответствующий величине поля 10^{-10} - 10^{-8} Тл. Величина наводки сильно зависит от взаимного расположения коммуникаций радиостанции и ЛМЛС, так что ни число, ни вид измерительных каналов ЛМЛС не влияют на окончательный сигнал ошибки. Очевидно, применение радиочастотной защиты всех элементов и коммуникаций ЛМЛС может существенно снизить влияние наводок.

5. Несовершенство антенны. Для магнитометрической антенны, изготавливаемой с применением фотолитографии, точность соблюдения размеров не превышает 1 мкм; при площади 1×1 см² это соответствует неточности площади витка $\sim 2 \cdot 10^{-4}$. Для каждой конкретной антенны соответствующий поправочный коэффициент может быть измерен (с применением эталона магнитного поля) с точностью до шестого знака. Значит, суммарная неточность, возникающая по этой причине при измерении поля величины A (Тл), составляет $\Delta A = 10^{-6}(A + \Pi)$, где Π - все сигналы ошибки, возникающие непосредственно в антенне. Увеличение числа магнитометрических каналов уменьшает эту ошибку до $\Delta A = 10^{-6} N^{-\frac{1}{2}}(A + \Pi)$. Применение трехкомпонентных магнитометров не вносит изменений, поскольку измерение и анализ каждой из компонент проводится независимо.

Переход к градиентометрической антенне существенно меняет ситуацию. При той же точности изготовления антенны астатизм ее (т.е. относительное неравенство площадей витков) составляет $\sim 3 \cdot 10^{-4}$, причем измерить и откалибровать этот астатизм значительно труднее из-за отсутствия эталона градиента магнитного поля. Применение механических подстроечных элементов (сверхпроводящих или ферромагнитных), уменьшая астатизм по заданной компоненте, почти неизбежно вызывает перекос диаграммы чувствительности, т.е. проникновение в антенный контур перпендикулярных компонент поля и градиента, что еще больше усложняет измерения. Поэтому даже тщательные меры, повидимому, не в состоянии уменьшить астатизм градиентометрической антенны лучше, чем до

10^{-5} (кстати, это не всегда и нужно, поскольку неоднородное ферромагнитное окружение все равно сведет к нулю все лишние усилия). В таком случае основной сигнал ошибки ΔB даст не градиентный сигнал, а сигнал от поля $10^{-5}(A+H)$, что в пересчете на градиент дает $2,5 \cdot 10^{-5}(A+H)$. Число измерительных каналов влияет здесь так же, как и при магнитометрических измерениях. Однако если параллельно с градиентом независимо измерять и само поле, то ошибку измерения градиента можно уменьшить по крайней мере на порядок и она уже станет сравнимой с ошибкой из-за незнания точной площади антенных петель $3 \cdot 10^{-4}B$, где B — градиентный сигнал.

Непараллельность витков градиентометрической антенны при фотолитографическом способе изготовления на базе твердотельного носителя с оптической подготовкой и шлифовкой рабочих поверхностей может быть уменьшена до угловой секунды, т.е. $\sim 2 \cdot 10^{-6}$ рад. Непараллельность витков может вызвать появление сигнала в измерительной цепи от поперечной компоненты поля. Предположив, что все три компоненты поля близки по величине, нетрудно показать, что роль непараллельности существенно ниже, чем астатизма.

Имеет смысл обсудить здесь целесообразность прямого измерения второй производной поля. Величина сигнала ошибки, обусловленного астатизмом антенны, очевидно, имеет то же значение. Подстройка антенны градиентометра второго порядка значительно сложнее и ненадежнее, т.к. здесь надо искать точку абсолютного минимума разбаланса по шести независимым параметрам (ΔS_1 и ΔS_2 площади правого и левого крайних витков, а также $\Delta \alpha_x$ и $\Delta \alpha_y$ углов наклона по каждой из двух ортогональных координат для каждого из двух крайних витков антенны). Если учесть еще и неизбежную и неконтролируемую "коррекцию" наших усилий внешними ферромагнитными массами на месте работы, то ясно станет, что уменьшить сигнал ошибки ниже $\sim 10^{-4}A$ нет практически никакой возможности. А поскольку рабочий сигнал градиентометра 2 порядка от объек-

та, удаленного на 100 м, на пять порядков меньше, чем от магнитометра, то ясно, что заметить рабочий сигнал H'' при фоновом сигнале, в 10 раз большем по величине, почти невозможно, откуда следует вывод, что для целей дальней ($> 30-50$ м) магнитолокации измерять непосредственно вторую производную магнитного поля бессмысленно.

Поэтому, кстати, в таблицах 2 и 3 набор структур ЛМЛС ограничен и не включает каналов измерения третьей производной, а структура с измерением второй производной приведена без особой надежды на реальное ~~ее~~ использование при имеющихся сейчас средствах устранения или учета помех.

6. Дрейф характеристик электронного тракта. Рабочая полоса частот 0,01-1 Гц означает, что коэффициент передачи электронного тракта каждого канала ЛМЛС должен сохранять требуемую стабильность в течение 100 сек. Если за 8 часов уход характеристик электроники составляет $10^{-2}\%$, то за 100 сек за счет МПЗ набегит ошибка $\frac{10^{-4} \cdot 100 \cdot 4 \cdot 10^{-5}}{3 \cdot 10^4} = \sim 10^{-11}$ Тл. Если этот дрейф имеет однонаправленный характер во всех каналах, то он практически не скажется на результатах (из-за разностного характера расчетов); однако в общем случае температурные коэффициенты изменения характеристик электронных компонентов имеют большой разброс, и вычисленную величину ошибки можно принять за максимальную. Она не зависит от вида измерений, но зависит от числа точек измерения. Один из путей уменьшения этой ошибки - отслеживать кинетику изменения коэффициента передачи и "предсказывать" его значение на очередной цикл измерений.

7. Нестабильность механического положения антенны. Сквид-датчик на длинной тонкостенной штанге устанавливается в сосуде Дьюара, который, в свою очередь, с помощью тех или иных устройств устанавливается и фиксируется в заданном положении на местности. В многоточечной ЛМЛС ориентация всех каналов в течение цикла измерений должна сохраняться неизменной. Имеется, однако, масса факторов, вы-

зывающих неконтролируемые колебания и наклоны датчиков: 1) неоднородное термическое расширение элементов сосуда Дьюара, 2) недостаточная жесткость грунта и неоднородность его деформации за счет изменения окружающей температуры и влажности, 3) наклоны и колебания грунта за счет перемещения массивных тел, 4) ветровые нагрузки.

Если ЛМЛС размещается на транспортном средстве, снабженном рессорами, то определяющим фактором будет ветровая нагрузка, которая при сильных порывах может достигать $I^0 = 0,02$ рад, это вызовет появление в магнитометрической антенне сигнала порядка $0,02 \times 4 \cdot 10^{-5} = 10^{-6}$ Тл. При установке ЛМЛС на жестком основании в закрытом помещении ветровая нагрузка не может вызвать наклона больше чем на 10^{-6} рад, соответствующий сигнал ошибки составит $\sim 4 \cdot 10^{-11}$ Тл. Наконец, в подземном помещении ветровая нагрузка вообще не имеет места.

Неоднородное термическое расширение элементов сосуда Дьюара особенно опасно при работе в таких сосудах, где антенна (иногда вместе со сквидом) крепится на извлекаемом длинном (до 1 метра) тонкостенном стержне, несущем в себе и все коммуникации датчика с внешним миром (в частности, именно такая схема крепления используется при работе в транспортном сосуде любой емкости). Испарение и понижение уровня гелия в сосуде, испарение азота из азотной рубашки, изменение степени обмерзания наружной горловины, изменение положения наружных кабелей, "висящих" на горловине, - все это в состоянии изменить ориентацию антенны на угол до $0,1^0 = 0,002$ рад и, соответственно, вызвать появление сигнала ошибки $\sim 10^{-7}$ Тл. Однако, поскольку процессы испарения характеризуются временами в десятки часов, то за 1,5 минуты сигнал ошибки не должен превысить $\sim 3 \cdot 10^{-11}$ Тл. Если же конструкция сосуда Дьюара достаточно жесткая и температурные колебания наклона внутренней полости сосуда исключены, а сама сверхпроводящая антенна жестко прикреплена к стенкам сосуда, то оставшиеся колебания наклона (например, за счет разности температур в I^0 различных частей наруж-

ной боковой стенки сосуда) имеют величину $10^{-6}-10^{-7}$ и характерное время изменения $\sim 10^2-10^3$ мин, что дает сигнал ошибки $5 \cdot 10^{-15} - 5 \cdot 10^{-13}$ Тл.

Наклоны грунта, вызванные геофизическими факторами, можно оценить из геофизических данных. Для скальных грунтов в сейсмически спокойных районах основным источником переменного наклона служат приливные колебания литосферы, амплитуда которых составляет $3 \cdot 10^{-7}$ рад, период - 12 часов, что за 1,5 минуты составит $\sim 10^{-9}$ рад - существенно меньше всех рассмотренных выше колебаний наклона.

Самые большие колебания наклона в мягких водонасыщенных грунтах вызваны промерзанием и оттаиванием грунта. Если среднесуточная температура близка к 0°C , то суточные колебания толщины промерзшего грунта могут достигать 1-2 см при неоднородности этой величины 0,5-1 см. Если принять расширение грунта при замерзании равным 10%, то на базовом отрезке длиной 2 м суточные колебания наклона достигают $(2,5-5) \cdot 10^{-4}$ рад, что за 1,5 минуты дает сигнал ошибки $(2-4) \cdot 10^{-11}$ Тл. Летние и зимние колебания температуры, не связанные с промерзанием, можно принять на 2 порядка меньшими.

Изменения наклона, связанные с перемещением людей или других массивных объектов, не содержащих ферромагнитных материалов, можно оценить исходя из следующих соображений. Если человек весом $P = 80$ кг находится на расстоянии R м от магнитометра, то угол наклона грунта можно оценить по формуле $\alpha \approx \frac{P}{E R^2}$, что при $P = 80$ кг, $E = 2,5 \cdot 10^{11}$ Г/см² и $R = 10$ м составит $\alpha \approx 10^{-13}$, т.е. пренебрежимо малую величину. Однако, удары о грунт (при шагах, например) вызывают упругие волны и раскачку колебаний на резонансных частотах, и если таковые попадают в рабочий диапазон частот ЛМЛС, дело может кончиться появлением узкочастотного сигнала ошибки, величина которого зависит и от характера возбуждающего воздействия, и от упругости грунта, и от резонансной частоты.

Таким образом, если исключить быстрые ударные колебания (они опасны еще и из-за опасности сбоя сквида), то уровень сигнала помех можно оценить для единичного магнитометра в $5 \cdot 10^{-13}$ – $5 \cdot 10^{-11}$ Тл без учета ветровых колебаний и до 10^{-6} Тл– на транспортных средствах с рессорами при сильной ветровой нагрузке. Для градиентометрических антенн соответствующие сигналы ошибки составляют $3 \cdot 10^{-19}$ – $3 \cdot 10^{-17}$ Тл/м и $6 \cdot 10^{-13}$ Тл/м. В многоточечных ЛМЛС ошибка, как и раньше, уменьшается в $\sqrt{N}$ раз.