

Таблица 10. Шумовой сигнал в диапазоне 0,01-1 Гц.

Вид измерительного устройства Источник сигнала помехи	одноком- понент- ный маг- нитометр	N одно- компо- нентных ма- гнитомет- ров	трехком- понент- ный маг- нитометр	N трех- компо- нентных ма- гнитомет- ров	одноком- понент- ный гра- диенто- метр	N одно- компо- нентных гра- диенто- метров	трехком- понент- ный гра- диенто- метр	N трех- компо- нентных гра- диенто- метров
	Тл				Тл/м			
МЛЗ (включая атмо- сферные вариации)	$5 \cdot 10^{-10}$ $1,5 \cdot 10^{-8}$	$5 \cdot 10^{-16}$ $1,5 \cdot 10^{-13}$	$5 \cdot 10^{-10}$ $1,5 \cdot 10^{-8}$	$5 \cdot 10^{-16}$ $1,5 \cdot 10^{-13}$	$5 \cdot 10^{-14}$ $1,5 \cdot 10^{-11}$	$5 \cdot 10^{-20}$ $1,5 \cdot 10^{-16}$	$5 \cdot 10^{-14}$ $1,5 \cdot 10^{-11}$	$5 \cdot 10^{-20}$ $1,5 \cdot 10^{-16}$
Посторонние ферро- магнитные массы	$5 \cdot 10^{-12}$ $1,5 \cdot 10^{-10}$	$3 \cdot 10^{-133}$ $5 \cdot 10^{-12}$	$5 \cdot 10^{-12}$ $1,5 \cdot 10^{-10}$	$3 \cdot 10^{-13}$ $6 \cdot 10^{-12}$	$10^{-17}$ $10^{-11}$	$10^{-17}$ $10^{-11}$	$3 \cdot 10^{-19}$ $3 \cdot 10^{-13}$	$3 \cdot 10^{-19}$ $3 \cdot 10^{-13}$
Городские индуст- риальные помехи	$2 \cdot 10^{-7}$	$5 \cdot 10^{-9}$	$2 \cdot 10^{-7}$	$5 \cdot 10^{-9}$	$5 \cdot 10^{-11}$	$5 \cdot 10^{-12}$	$5 \cdot 10^{-11}$	$5 \cdot 10^{-12}$
Помехи от близкой эл. и радиоаппар.	$10^{-10}$ $10^{-8}$	$10^{-10}$ $10^{-8}$	$10^{-10}$ $10^{-8}$	$2,5 \cdot 10^{-10}$ $10^{-8}$	$2,5 \cdot 10^{-10}$ $2,5 \cdot 10^{-8}$	$2,5 \cdot 10^{-10}$ $2,5 \cdot 10^{-8}$	$2,5 \cdot 10^{-10}$ $2,5 \cdot 10^{-8}$	$2,5 \cdot 10^{-10}$ $2,5 \cdot 10^{-8}$
Несовершенство ан- тенны (планар.)	$10^{-6}(A \&$ $+ П)$	$10^{-6}N^{-1/2}$ $.(A+П)$	$10^{-6}(A+$ $+П)$	$10^{-6}/\sqrt{N}$ $.(A+П)$	$2,5 \cdot 10^{-5}$ $.(A+П)$	$2,5 \cdot 10^{-5}$ $\cdot \sqrt{N}(A+П)$ $\sqrt{N}$	$2,5 \cdot 10^{-6}$ $.(A+П)+$ $+3 \cdot 10^{-4}B$	$[2,5 \cdot 10^{-6}$ $.(A+П) +$ $+3 \cdot 10^{-4}B] \sqrt{N}$
Дрейф характеристик электронного тракта	$10^{-11}$	$10^{-11}/\sqrt{N}$	$10^{-11}$	$10^{-11}/\sqrt{N}$	$3 \cdot 10^{-7}B$	$3 \cdot 10^{-7}B/\sqrt{N}$	$3 \cdot 10^{-7}B$	$3 \cdot 10^{-7}B/\sqrt{N}$
Нестабильность мех. положения антенны	$5 \cdot 10^{-13}$ $10^{-6}$	$(5 \cdot 10^{-13}$ $-10^{-6})/\sqrt{N}$	$2 \cdot 10^{-14}$	$2 \cdot 10^{-14}/\sqrt{N}$	$3 \cdot 10^{-19}$ $6 \cdot 10^{-13}$	$(3 \cdot 10^{-19}$ $-6 \cdot 10^{-13})/\sqrt{N}$	$10^{-19}$ $2 \cdot 10^{-13}$	$(3 \cdot 10^{-19}$ $-2 \cdot 10^{-13})/\sqrt{N}$

Примечания: 1. Числовые данные приведены для площади антенного витка  $1 \text{ см}^2$ , чувствительности  $10^{-14} \text{ Тл}/\sqrt{\text{Гц}}$ ,  $l=0,4 \text{ м}$  и  $L=100 \text{ м}$ . 2. Предполагается, что ориентация диполя случайна относительно ЛМЛС. Условные обозначения в таблице: А- величина магнитного поля от объекта, В- величина производной поля от объекта, П- суммарный сигнал помех от всех внешних источников. Указаны максимальные и минимальные значения шумового сигнала.

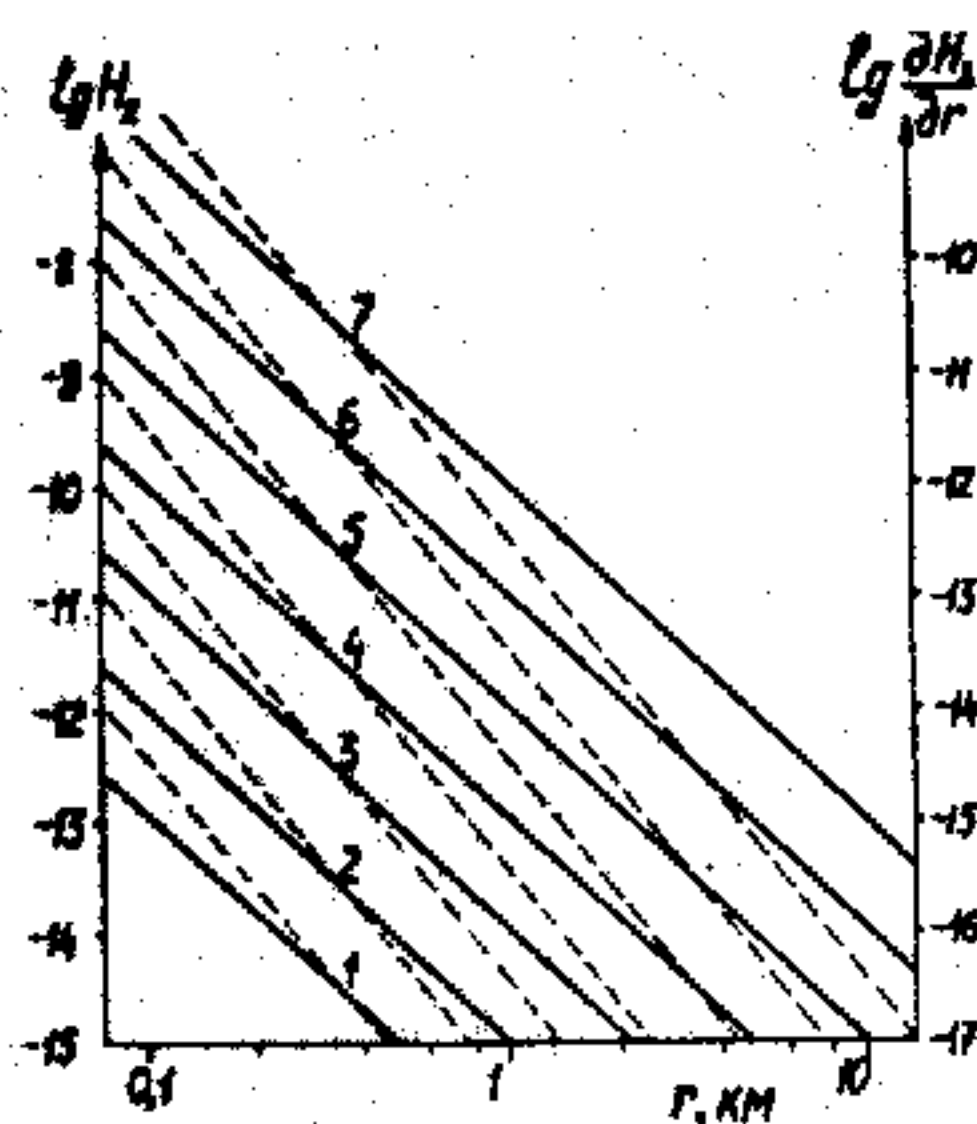


Рис.4. Величина магнитного поля  $H_z$  (сплошные линии) и градиента поля  $\frac{\partial H_z}{\partial r}$  (пунктир), создаваемых объектами с различным дипольным моментом  $M$ , в зависимости от расстояния  $r$  между магнитолокатором и объектом. 1-  $M=1 \text{ А.м}^2$ ; 2-  $10$ ; 3- $10^2$ ; 4- $10^3$ ; 5- $10^4$ ; 6- $10^5$ ; 7-  $M= 10^6 \text{ А.м}^2$ .



грунте, в 5 километрах – деревня, в радиусе 40 км более крупных населенных пунктов нет, в 40 км расположен городок с населением 70 тыс. человек. Связь ЛМЛС с внешним миром осуществляется телефоном.

Проверим для начала по таблице, какие из внешних источников помех наиболее опасны. Городские индустриальные помехи дают  $5 \cdot 10^{-9}$  Тл, но в нашем случае город удален на 40 км, и если считать, что в 12 км от города шумовой сигнал снижается до уровня МПЗ, то в 40 км он будет еще в  $3^5 = 343$  раза меньше, т.е. на уровне  $1,5 \cdot 10^{-12}$  Тл. Однако эти цифры относятся к крупному городу с электрифицированным транспортом. В нашем случае такого транспорта нет, вследствие чего уровень шумового сигнала на порядок ниже (он обусловлен только токами заземления и утечек торгового и мелкопромышленного оборудования и бытовой электро- и радиоаппаратуры). Таким образом, городок дает шум  $\sim 1,5 \cdot 10^{-13}$  Тл. Близлежащая деревня с полусотней радиоприемников, телевизоров и холодильников эквивалентна случайному дипольному моменту с амплитудным значением  $\sim 10^3$  А.м<sup>2</sup>, а значит, шумовой сигнал от нее  $\frac{10^3}{2\pi \cdot 5^3 \cdot 10^9} = 1,3 \cdot 10^{-11}$  А/м =  $1,5 \cdot 10^{-15}$  Тл.

Следующим по мощности источником внешних помех в табл. 10 является близкорасположенная электро- и радиоаппаратура. Таковой в ближайшем окружении ЛМЛС быть не должно. Собственная аналитическая аппаратура при условии двойной изоляции от корпуса и экранированных цепей питания не должна шуметь сильнее, чем диполь с моментом  $10^{-3}$  А.м<sup>2</sup>. Это значит, что для шумового поля  $10^{-14}$  Тл ее следует отнести на расстояние не ближе  $r = \left(\frac{M}{2\pi H}\right)^{1/4} = \left(\frac{10^{-3}}{2\pi \cdot 8 \cdot 10^{-9}}\right)^{1/4} = 12$  метров от измерительного канала.

Вариации МПЗ в летнее время существенно меняются с погодой. А поскольку основные перемещения техники следует ожидать именно при плохой погоде (дождь, туман, гроза), то уровень вариаций  $1,5 \cdot 10^{-13}$  Тл следует, видимо, принять за основной (полагая, что "в лучшие времена" он может снизиться на три порядка). Ну и, наконец, посторонние ферромагнитные массы в лесу отсутствуют, так что мы могли бы себе поз-

волить "организовать" собственное ферромагнитное окружение, обеспечивающее концентрацию магнитного поля на датчик с множителем 2 - 3 (тем самым увеличив его чувствительность до  $(3-5) \cdot 10^{-15}$  Тл). Однако, делать это нет смысла, т.к. шум городка не позволит воспользоваться увеличением чувствительности.

Таким образом, суммарный шумовой сигнал от внешних источников помех составляет  $\sim 2 \cdot 10^{-13}$  Тл. Теперь рассмотрим внутренние источники ошибок. Наиболее серьезным является дрейф характеристик электронного тракта. Шум в  $5 \cdot 10^{-12}$  Тл слишком резко ухудшает характеристики ЛМДС в целом, так что совершенно необходимо улучшить временную стабильность коэффициента передачи электронного тракта как минимум ~~на~~ на полтора порядка. Другой выход - тестировать все каналы каждую секунду с точностью до шестого знака. Тогда низкочастотная нестабильность схемы даст сигнал ошибки не более  $1,5 \cdot 10^{-13}$  Тл.

Что касается нестабильности механического положения антенн сквид-датчиков, то здесь, зарывшись в землю на глубину 2-3 м, укрепившись на уплотненном глиняном грунте и обеспечив жесткое крепление антенны в сосуде Дьюара, можно рассчитывать на уменьшение сигнала ошибки до  $\sim 5 \cdot 10^{-14}$  Тл. И, наконец, последний источник ошибки из таблицы 10 - несовершенство самой планарной антенны даст сигнал ошибки  $4 \cdot 10^{-5}(A+P)$ , где A - измеряемое поле от объекта, т.е. вклад этого фактора составляет тысячные доли процента.

Итак, при выполнении всех названных условий шумовой сигнал  $\sigma_n$  составляет  $\sim 2,6 \cdot 10^{-13}$  Тл. Это означает, что чувствительность самого сквид-датчика  $10^{-14}$  Тл в данной системе явно избыточна, можно обойтись и более грубым прибором. Что же касается конкретной задачи, то в первоначальном виде (идентификация объектов, движущихся как колоннами, так и поодиночке) она данной системой решается лишь в хорошую погоду (нужна чувствительность  $\sim 1,9 \cdot 10^{-13}$  Тл). Для одиночных объектов (необходимая чувствительность  $\sim 7 \cdot 10^{-13}$  Тл) задача решается



с запасом в любую погоду. С таким же запасом решается и первоначальная задача, если добавить еще один, удаленный (на 50-100 м) канал измерения. Более того, эти же задачи решаются и трехшочечной С-ЛМЛС типа  $3(N_y + N'_y)$  (требуемая чувствительность  $\sim 5,5 \cdot 10^{-13}$  Тл).

Таким образом, ни внешние помехи, рассмотренные в предыдущем параграфе, ни несовершенство механической конструкции датчиков, ни несовершенство и дрейф характеристик электроники не являются фатальными для ЛМЛС. Однако ясно, что качественную работу ЛМЛС можно обеспечить, лишь оснастив ее достаточно "умным" счетно-аналитическим устройством, задачей которого является выполнение следующих функций:

- измерение начальных значений характеристик магнитного поля в  $N$  каналах и запоминание "магнитной карты района",
- измерение текущих значений характеристик магнитного поля
- тестирование коэффициентов передачи каждого из  $N$  каналов,
- вычисление текущих значений характеристик магнитного поля в  $N$  каналах,
- сравнение текущих значений этих характеристик с "магнитной картой" и определение изменений каждой из характеристик,
- проверка выполнения условий обнаружения объекта и в случае выполнения - сигнализация о наличии объекта (в случае невыполнения - возврат к измерению текущих значений),
- проверка критерия второй задачи (локация) и в случае выполнения - расчет первого приближения (в случае невыполнения - возврат к измерению текущих значений),
- сигнализация о локации, уточнение координат объекта по итерационному алгоритму,
- ввод данных о координатах в оперативную память и определение направления движения и скорости перемещения объекта,

-проверка выполнения критерия по третьей задаче (идентификация объекта) и, в случае выполнения, - сигнализация о переходе к третьей задаче и о величине момента объекта (в случае невыполнения - возврат к измерениям характеристик поля).

Круг вопросов, решаемых счетно-аналитическим устройством на стадии второй и третьей задач, можно (и нужно) расширить, включив сюда и вычисление характеристик движения объекта (курс, скорость). С другой стороны, на начальном этапе работы ЛМЛС необходимо обеспечить автоматическое выполнение ряда регламентных операций, обеспечивающий правильный режим работы сквид-датчика.

По сложности рабочий алгоритм ЛМЛС, обеспечивающий выполнение всех этих функций, сравним с алгоритмами многочисленных электронных игр, т.е. на современном уровне - вполне осуществим.

### 3. Заключение.

Подводя итоги, переищим основные особенности работы линейного магнитолокатора и его отличие от общей схемы МЛС.

1. Линейный магнитолокатор обладает значительной избыточностью и вследствие этого - значительной живучестью (устойчивостью к отказам).

2. Принцип действия ЛМЛС в режиме локации сводится к тому, что вначале она "упрощает" задачу, сводя ее к задаче меньшей размерности (из трехмерной - к двумерной или даже одномерной), находит точное решение этой приближенной, упрощенной задачи, затем использует это решение в качестве нулевого приближения реальной задачи и методом минимизации квадратичного функционала (I) находит истинное решение реальной задачи.

Названная последовательность расчетных операций обладает гораздо большей устойчивостью, надежностью и точностью, чем в случае применения традиционных схем решения задачи магнитолокации.