

# **ЛИНЕЙНЫЙ МАГНИТОЛОКАТОР**

**ТИТОВ В.В.**

Москва  
1987

## Аннотация

В работе анализируются возможности магнитолокации с применением СКВИДОВ – сверхпроводящих приборов на основе эффекта Джозефсона. Оцениваются сравнительные характеристики линейных магнитолокаторов в зависимости от типа измеряемых величин, структуры локатора и вида задачи, решаемой локатором. Установлено, что для целей дальнейшей локализации градиентометрические датчики практически неприемлемы (особенно для измерения производных выше первого порядка). Показано, что линейный магнитолокатор, измеряющий две компоненты магнитного поля, обладает практически круговой диаграммой чувствительности, т.е. для целей кругового обзора практически идеален. Оценивается влияние различных факторов, мешающих работе магнитолокатора. Установлено, что предельные возможности магнитолокации на сегодняшний день ограничены не столько чувствительностью СКВИД-датчиков (она уже достаточно высока), а в первую очередь внешними помехами, которые не позволяют зафиксировать поле меньше  $(2-3) \cdot 10^{-13}$  Тл. Этого, однако, достаточно для решения целого ряда практически важных задач, так что на повестке дня стоят задачи создания реального макета линейного магнитолокатора и разработки программного обеспечения такого локатора.

## Содержание

I. Введение.....	3
2. Основная часть	
2.1. Об алгоритмах решения задач магнитолокации.....	4
2.2. Виды линейных магнитолокаторов.....	8
2.3. Характеристики поля уединенного диполя.....	16
2.4. Одномерные задачи магнитолокации.....	23
2.5. Сравнение характеристик ЛМЛС различных типов в одномерной задаче магнитолокации.....	31
2.6. Задачи магнитолокации на плоскости.....	35
2.7. О выборе оптимальной структуры и типа ЛМЛС.....	40
2.8. "Подводные камни" магнитолокации.....	46
3. Заключение.....	52
Приложение А. Угловые характеристики магнитного поля диполя и угловая диаграмма чувствительности ЛМЛС.....	57
Приложение В. Расчетные формулы для решения задач линейной одномерной магнитолокации (не вошедшие в основной текст).....	65
Приложение С. О разрешающей способности одномерного магнитолокатора.....	68
Приложение 7 Анализ основных источников помех для работы ЛМЛС.....	73
Список литературы.....	85

## І. Введение.

До недавнего времени магнитное поле почти не использовалось для дальнего обнаружения военной техники (миноискатели и магнитные мины не в счет, т.к. они обладают малым радиусом действия). Однако в последнее время появились принципиально новые магнитометрические приборы, основанные на эффекте Джозефсона и обладающие практически предельно возможной чувствительностью, ограниченной уже только квантовым пределом. Поэтому представляет интерес проанализировать, что же может дать магнитолокация и какими она обладает особенностями по сравнению с традиционными видами локации.

Любой предмет, содержащий в себе ферромагнитный материал, обладает собственным магнитным моментом даже в том случае, когда он специально не намагничивался. Причиной тому — магнитное поле Земли (МПЗ). В простейшем случае поле такого предмета эквивалентно полю некоторого магнитного диполя. Это поле уменьшается с расстоянием как  $R^{-3}$ , т.е. любая железная деталь "дает о себе знать" своим магнитным полем в некотором объеме с характерным линейным размером  $R$ . Экранировать это поле практически невозможно (разве что еще большим железным экраном), оно не ослабляется ни туманом, ни облаками, ни лесом, ни горами, ни водой. Таким образом, магнитолокатор сохраняет работоспособность и все характеристики при любых погодных условиях, в любое время суток и в любой местности (в том числе и под землей, и под водой).

Вторым, не менее важным достоинством магнитолокации является пассивность. Локатор ничего не излучает и вследствие этого может быть сделан необнаружимым.

Наконец, третьей особенностью магнитолокатора является его всенаправленность. Хотя каждый сквид (активный элемент магнитометра

на эффекте Джозефсона) обладает векторной характеристикой чувствительности, т.е. реагирует только на ту компоненту магнитного поля, которая перпендикулярна плоскости его антенного контура, вся сумма датчиков, составляющих измерительную часть трехкоординатного магнитолокатора, обеспечивает всенаправленную чувствительность.

Магнитометрический датчик локатора измеряет вектор магнитного поля (или производную любого порядка от любой его компоненты по любой координате). Задачей магнитолокатора является вычисление положения и ориентации магнитного диполя, вызвавшего данные сигналы в системе датчиков магнитолокатора, расположенных заданным образом. Это — задача более сложная, чем у любого активного локатора (где направление луча дает направление на объект, т.е. его угловые координаты, а время задержки отраженного сигнала дает дальность), здесь требуется непростая математическая обработка. К сожалению, большинство алгоритмов, разработанных для решения обратной магнитометрической и гравиметрической задач (они сходны), весьма чувствительны к точности измерения исходных величин, поэтому точность и пределы надежной локации объектов по их магнитному полю пока существенно хуже, чем у активных видов локации.

## 2. Основная часть.

### 2.1. Об алгоритмах решения задач магнитолокации.

Первые алгоритмы решения обратной магнитометрической задачи для одиночного диполя составлялись в предположении точного соответствия числа уравнений числу неизвестных. Поскольку оба числа для общей задачи локации единичного магнитного диполя  $\text{в пространстве}$  равны 6, уравнения (14) в [1] достаточно громоздки и в процессе их преобразования и решения ошибка неопозволительно возрастает; соответственно, в результате неопределенность координат объекта оказывается весьма значительной.

Существует, однако, алгоритм, почти свободный от "дополнительных" ошибок, т.е. не включающий наиболее неприятных промежуточных операций типа деления на  $(A - B)$ , где  $A$  и  $B$  - два больших и очень близких по величине числа, измеренных с конечной точностью. Это - алгоритм минимизации квадратичного функционала [2]

$$S = \sum_i \frac{1}{\sigma_i^2} [u_i(\vec{M}, \vec{r}) - u_{i0}]^2 \quad (I)$$

где  $u_{i0}$  - некая измеренная магнитолокатором величина,  $u_i(\vec{M}, \vec{r})$  - та же величина, рассчитанная для диполя  $\vec{M}$ , помещенного в точку  $\vec{r}$ .  $\sigma_i^2$  - среднеквадратичная ошибка измерения величины  $u_i$  (при условии нормального распределения ошибок измерения).

Не обсуждая недостатков этого алгоритма (медленная сходимость, возможность сбоя при выходе в локальный, не абсолютный минимум функционала), отметим, что благодаря простоте формулы он практически не вносит дополнительных ошибок, кроме тех, которые обусловлены и учтены в (I) множителями  $(1/\sigma_i^2)$  неточностью измерения. Если еще учесть, что сверхпроводящие сквид-магнитометры обладают уникальной особенностью сохранять одну и ту же точность измерения в большом динамическом диапазоне (до 140 дБ), то можно проводить сравнительный анализ магнитолокационных систем разной структуры в простом предположении, что каждый датчик МЛС измеряет свою величину (поле или производную) с фиксированной абсолютной ошибкой.

Обычно структура МЛС (и алгоритм обработки результатов измерений) выбиралась из тех соображений, чтобы число измеряемых величин было равно числу неизвестных (или чуть больше). Увеличение числа измеряемых величин (т.е. числа каналов магнитолокатора) делает задачу переопределенной, переводя ее в класс некорректных задач, но одновременно и позволяет застраховаться от отказов какого-либо из каналов. В этом смысле алгоритм минимизации функционала (I) обладает еще и тем преимуществом, что его вид и работа практически не меня-

ются с изменением числа каналов. Более того, при существенной избыточности МЛС защита от отказов реализуется простейшими средствами (отказавший канал сам дает о себе знать аномально большим вкладом в функционал (I)).

Ахиллесовой пятой алгоритма (I) является то, что для его "запуска" требуется знание исходного, нулевого приближения искомых величин. Впрочем, алгоритм может работать и при произвольном задании нулевого приближения, хотя в этом случае "траектория" поиска решения может быть неоптимальной; более того, есть определенный риск получить ложное решение или вообще его не получить (если траектория выйдет в область, где  $|\frac{\partial S}{\partial R}| + |\frac{\partial S}{\partial M}| = 0$ ). Ниже мы оценим степень риска попасть в такую ситуацию.

Задачи магнитолокации достаточно разнообразны, при этом общий случай локации произвольно ориентированного диполя в пространстве является отнюдь не самой распространенной задачей. Гораздо чаще положение объекта (а иногда и ориентация его магнитного момента) лимитируется теми или иными дополнительными условиями. В частности, все вопросы наземной локации могут решаться в двумерном приближении, на плоскости, или в несколько более сложном, но тоже двумерном случае перемещения по некоей двумерной поверхности, отличающейся от плоскости не слишком сильно (т.е. при условии, что  $z^2 \ll x^2 + y^2$ , где  $z$  - вертикальная координата,  $x$  и  $y$  - горизонтальные координаты объекта). Задача может стать даже и одномерной, например, для контроля перемещения объектов по некоей фиксированной трассе (автодороге или железной дороге).

Столь же разнообразны и структуры магнитолокаторов. В принципе магнитолокатором может являться любая система из произвольно размещенных измерителей любых характеристик магнитного поля, объединенных общим счетно-аналитическим устройством, на входы которого подается полная информация с каждого измерителя (т.е. данные о положении и ориентации измерителя, а также о виде и величине измеряемо-

го параметра); желательно, конечно, чтобы локатор сохранял свои тактико-технические параметры (хотя бы в несколько ухудшенном виде) при частичном отсутствии информации. В этом смысле "избыточность" числа каналов магнитолокатора проявляется в его повышенной живучести, и чем больше степень избыточности, тем менее локатор чувствителен к выходу из строя одного (или нескольких) каналов.

Многообразие структур магнитолокатора легко "сворачивается" по аналогии с многообразием задач. Необходимость в трехмерном размещении измерительных точек локатора встречается крайне редко, тем более что трехмерные задачи локализации решаются и двумерными, и одномерными, и даже нульмерными локаторами (при этом, правда, возможно неоднозначное решение, но во многих случаях эта неоднозначность легко снимается путем учета дополнительной информации, например, о невозможности нахождения подлодки выше уровня моря).

Поскольку процедура поиска исходного приближения для алгоритма (I) сильно упрощается по мере понижения размерности задачи и размерности локатора, то представляется естественным "выжать" максимум возможностей из магнитолокаторов минимальной размерности. Однако нульмерный, т.е. точечный локатор при всей своей привлекательности (компактность!) в этом отношении не является оптимальным, т.к. производные всех нужных порядков здесь пришлось бы измерять непосредственно. Поскольку и абсолютная, и относительная точность измерения производной поля тем хуже, чем выше порядок производной (доказательство этого будет приведено ниже), то в результате ненадежности локализации увеличивается катастрофически быстро по мере увеличения порядка производной, получаемой непосредственным измерением. В результате характеристики нульмерного локатора оказываются приемлемыми только для решения простейшей задачи обнаружения факта присутствия близкого постороннего объекта, обладающего магнитным моментом.