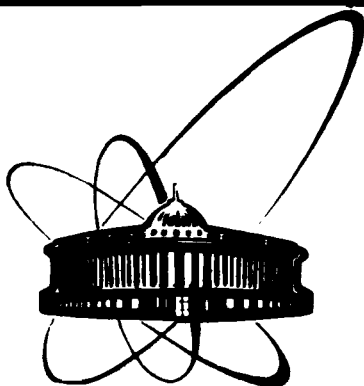


89-810

13



**ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА**

Д13-89-810

**Б. В. Васильев, А. Г. Лихачев,
В. Н. Полушкин, С. В. Учайкин**

**ГРАДИЕНТОМЕТР НА ОСНОВЕ ДВУХ
ОДНОИНДУКТИВНЫХ ВТСП-СКВИДОВ**

Направлено в журнал "IEEE Transactions on Magnetics"

1989

Введение

К середине 1989 года были разработаны сначала магнитометр [1], а впоследствии магнитокардиометр [2] на основе одноиндуктивного высокотемпературного сквида. В этих работах продемонстрирована высокая чувствительность, потенциально заложенная в высокотемпературных сквидах. Однако, как уже отмечалось в [2], выходной сигнал одноканального магнитокардиометра полностью содержит в себе шумы от вариаций поля Земли, промышленных помех, вибраций криостата и др. Так, даже на лучших записях, полученных таким способом магнитокардиограмм (см. [2]), отчетливо видны помехи (в первую очередь от вибраций криостата в поле Земли).

При использовании традиционных низкотемпературных сверхпроводников разработан эффективный метод снижения влияния избыточных помех такого рода - так называемая пространственная фильтрация. Поскольку на практике источники помех находятся на удаленном расстоянии от объекта измерений, то их магнитные поля являются квазиоднородными. Однородными можно считать и вариации поля Земли, если вблизи прибора отсутствуют ферромагнитные и проводящие материалы. Эффективно ослабить их влияние можно, использовав в качестве первичного преобразователя градиентометрический трансформатор потока, который отфильтровывает изменения квазиоднородных полей [3]. Создание такого трансформатора из высокотемпературных сверхпроводников представляет собой трудную и до сих пор нерешенную задачу. Это связано не только с технологической сложностью изготовления тонкой гибкой проволоки, но и с необходимостью обеспечения малости ее собственных шумов.

В настоящее время возможна пространственная фильтрация помех за счет градиентометрического включения двух одноиндуктивных скивдов. В данной статье приведены результаты исследования именно такого азотного сверхпроводящего квантового градиентометра и изучена возможность его применения в биомагнетизме, в частности, для измерения магнитокардиограммы сердца человека.

Методика приготовления скивда

Скивид был изготовлен из массивного образца поликристаллической керамики $Y_1Ba_2Cu_3O_{7-x}$, полученной при помощи процедуры твердофазного синтеза по технологии, подробно описанной в [4]. В таблетке из такой керамики размером $8 \times 8 \times 2$ мм в центре просверливалось отверстие диаметром 0,8 мм, служившее контуром квантования для скивда. Между отверстием и кромкой таблетки механически прорезалась щель, внутри которой оставался мостик, замыкающий контур квантования. Мостик обычно имел характерные размеры 10 мкм и должен был обладать критическим током I_c в единицы микроампер, так, чтобы основной параметр скивда

$$\beta = 2\pi L_B I_c / \Phi_0 \gg (1+2).$$

Здесь L_B - индуктивность контура квантования (обычно $\sim 2,5 \times 10^{-10}$ Гн), Φ_0 - квант магнитного потока.

Конструкция градиентометра

Схематическое изображение градиентометра представлено на рис. 1.

Два радиочастотных высокотемпературных скивда 1 были расположены соосно друг над другом в параллельных плоскостях на расстоянии 9 см, называемом базой градиентометра b . Скивды помещены в закрытые боксы 2 из фольгированного текстолита

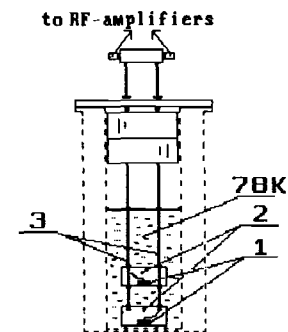


Рис. 1. Схематическое изображение сверхпроводящего квантового градиентометра.

1- радиочастотные однодырочные высокотемпературные сверхпроводящие квантовые интерферометры;
2- герметичные боксы из стеклотекстолита, покрытого тонким слоем меди, защищающего скивды от высокочастотных излучений;
3- нержавеющие трубки, обеспечивающие жесткость установки. Внутри трубок проходят радиочастотные кабели, связывающие скивды с генераторами накачки и радиочастотными усилителями. Градиентометр расположен в биомагнитном стеклопластиковом криостате. В качестве хладагента используется жидкий азот.

Боксы были жестко прикреплены к двум опорным нержавеющим трубкам 3, внутри которых проведены радиочастотные кабели, связывающие скивды с предварительными радиочастотными усилителями. Скивды помещены в биомагнитный пластиковый криостат с жидким азотом, поддерживающим температуру $T \approx 78$ К.

Основной канал построен на скивде, расположенном у дна криостата. Он предназначен для приема измеряемого полезного сигнала, источник которого находится в непосредственной от него близости вне криостата. Естественно, что в выходном сигнале канала содержатся все составляющие упомянутых ранее мешающих факторов. Верхний скивид значительно менее чувствителен к полезному сигналу из-за его пространственного ослабления, однако практически с той же чувствительностью, что и основной нижний скивид, улавливает помехи от удаленных источников. Выходные сигналы этих скивдов аппаратурно

вычитались один из другого, после чего в результирующем разностном сигнале остается полезная информация и сигнал разбаланса.

Функциональная схема градиентометра представлена на рис. 2.

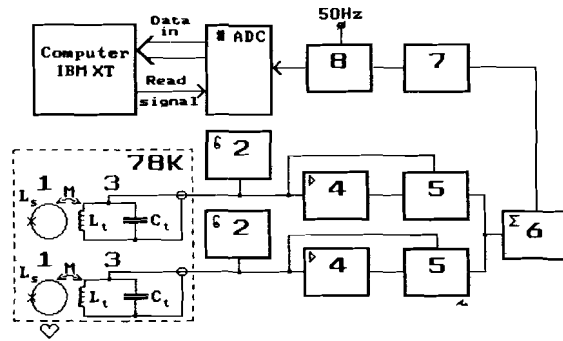


Рис. 2. Функциональная схема градиентометра.

- 1-радиочастотные сквиды;
- 2-генераторы радиочастотного тока смещения;
- 3-колебательные контуры, связывающие сквиды с генераторами накачки и радиочастотными усилителями;
- 4-радиочастотные усилители;
- 5-низкочастотные блоки, обеспечивающие дальнейшее усиление и преобразование сигналов сквидов;
- 6-аналоговый сумматор;
- 7-фильтр низких частот;
- 8-синхронный сетевой фильтр.

1 - радиочастотные сквиды, 2 - генераторы тока смещения, работающие на частотах, близких к резонансным частотам колебательных контуров $L_t C_t$ - 3, индуктивно связанных со сквидами. (Для того, чтобы избежать паразитных возбуждений радиочастотных усилителей из-за взаимного влияния каналов, собственные резонансные частоты колебательных контуров были разнесены приблизительно на 1 МГц). 4-5 - низкочастотные блоки, обеспечивающие дальнейшее усиление и преобразование сигналов сквидов. 6 - вычитающий блок, 7 - фильтр низкой частоты, 8 - синхронный сетевой фильтр.

Основные характеристики градиентометра

Описываемый градиентометр представляет собой, по-существу, два разнесенных на 9 см самостоятельных магнитометра. Методика измерения основных технических характеристик магнитометров подробно описана в [1]. Здесь приведем только результаты измерений. Индуктивность сквидов $L_s = 2.5 \cdot 10^{-10}$ Гн. Основной параметр для нижнего сквида $\beta \approx 1.2$, для верхнего сквида $\beta \approx 4$ в нулевом магнитном поле. В поле Земли основные параметры могут значительно изменяться.

Коэффициент связи колебательного контура $L_t C_t$ со сквидом $k \approx (0,15 \pm 0,01)$.

Ненагруженная добротность колебательного контура $Q=40$.

Разрешение по магнитному потоку сквидов в области белого шума в нулевом магнитном поле $\langle \Phi_N \rangle \approx 3,5 \cdot 10^{-4} \Phi_0 / \Gamma \text{ц}^{1/2}$.

Энергетическое разрешение сквидов

$$\epsilon \approx 9 \cdot 10^{-28} \text{ Дж/Гц, при } T=77,8 \text{ К.}$$

Спектральные плотности собственных шумов сквидов по магнитному полю в пермалловом экране приведены на рис. 3. Кривая 1 соответствует верхнему сквиду, кривая 2 соответствует нижнему сквиду, кривая 3 - спектральная плотность собственных шумов градиентометра в целом.

Из рис. 3 видно, что кривая 2 идет несколько ниже кривой 1. Это говорит о том, что сквиды с меньшим параметром β и работающие соответственно при меньшем уровне радиочастотного тока смещения, имеют более низкий уровень избыточных шумов.

Результирующий белый шум + кривая 3 при частотах $f > 10 \text{ Гц}$ Φ выражается через сумму квадратов спектральных плотностей шумов сквидов

$$\langle \Phi_{\Sigma} \rangle = (\langle \Phi_{N1} \rangle^2 + \langle \Phi_{N2} \rangle^2)^{1/2}.$$

Из кривой 3 легко определить собственную чувствительность градиентометра по магнитному полю

$$\langle G \rangle = \langle B_{\Sigma} \rangle / b \approx 3,1 \cdot 10^{-12} \text{ Тл/м Гц}^{1/2}.$$

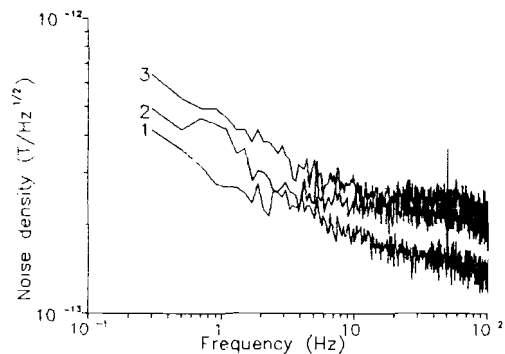


Рис. 3. Спектральная плотность шумов:
 кривая 1 - для нижнего сквида;
 кривая 2 - для верхнего сквида;
 кривая 3 - для градиентометра в целом после вычитания сигналов.

Следует отметить для сравнения, что чувствительность практических низкотемпературных градиентометров при той же базе b [5] примерно на порядок лучше.

Важным параметром, характеризующим качество градиентометра, является разбаланс приемных датчиков, возникающих из-за непараллельности и объемности сквидов. В данном случае даже при подаче однородного внешнего магнитного поля и одинаковых коэффициентах преобразования каналов на выходе градиентометра будет наблюдаться сигнал разбаланса ΔU .

Измерение разбаланса градиентометра проводилось в поле колец Гельмгольца. Первоначально кольца располагались таким образом, чтобы их ось совпадала с вертикальной осью градиентометра, а затем так, чтобы оси были взаимно перпендикулярны. В обмотки колец вводился синусоидальный (3-5) Гц ток, создававший поле с амплитудой B_{max} . Это поле измерялось сначала одним каналом градиентометра, дававшего на выходе сигнал с амплитудой U_m , а затем измерялась амплитуда сигнала на выходе градиентометра ΔU_i . Коэффициенты подавления вдоль i -оси при этом есть:

$$k_i = U_m / \Delta U_i.$$

Подавление вдоль вертикальной оси за счет подстройки коэффициента передачи каналов удается сделать очень высоким - более 10^3 .

Значительно труднее подавить разбаланс по боковым осям, возникающий за счет непараллельности сквидов. Разбалансы по вертикальной и боковым осям являются взаимно зависимыми, и выравнивание коэффициентов передачи каналов по сигналу от разбаланса одной из осей может существенно ухудшить разбаланс по другой, что заставляет искать компромисс. Экспериментально определение разбаланса по боковым осям производилось при $K_z=500$. При этом кольца Гельмгольца располагались так, чтобы их ось была перпендикулярна оси Z градиентометра.

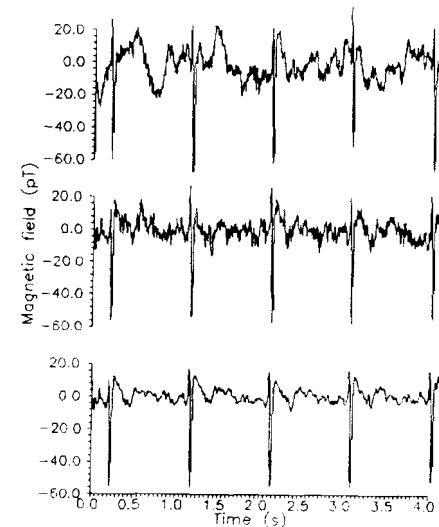


Рис. 4. Магнитокардиограммы сердца человека, снятые одновременно:

сверху - одним каналом на основе нижнего сквида;
 в середине - градиентометром в целом в реальном масштабе времени, в полосе частот 60 Гц;
 внизу - градиентометром в целом, после усреднения по четырем периодам.

Градиентометр поворачивался вокруг оси Z, и таким образом находилось положение, при котором на выходе градиентометра получался максимальный отклик с амплитудой ΔU_{\max} . В результате получилось, что минимальный коэффициент подавления по боковым осям

$$k_{x,y,\min} = U_m / \Delta U_{\max} \approx 32.$$

Для проверки работы градиентометра была снята магнитокардиограмма человека. На рис. 4 представлена типичная магнитокардиограмма, измеренная магнитометром (одним нижним каналом градиентометра) (верхняя кривая) и описанным градиентометром (кривая посередине). Записи проведены в полосе 60 Гц, в реальном масштабе времени. Измерения проводились внутри алюминиевой "бочки", расположенной на расстоянии 20-30 метров от ближайших зданий Института. Толщина стенок "бочки" примерно 5 мм.

Из сравнения этих двух магнитокардиограмм видно, что градиентометр значительно подавляет низкочастотные вариации магнитного поля Земли, низкочастотные промышленные помехи и влияние вибраций криостата. Для количественной оценки эффективности подавления мешающих факторов в точке снятия магнитокардиограмм были измерены спектры от магнитометра на основе нижнего сквида $\langle B_{n1} \rangle$ и градиентометра $\langle G \rangle$. Результаты измерений представлены на рис. 5 (кривые 1 и 2 соответственно). Общий коэффициент подавления мешающих факторов по всем трем осям, определенный через спектральные зависимости

$$k \approx \langle B_{n1} \rangle / \langle G \rangle \approx 10.$$

Из рис. 5 также можно сделать вывод о том, что реальная чувствительность градиентометра (кривая 2) в точке измерения кардиограммы хуже собственной чувствительности, полученной внутри магнитного экрана (кривая 3). В основном это можно объяснить с недокомпенсированными внешними помехами, но

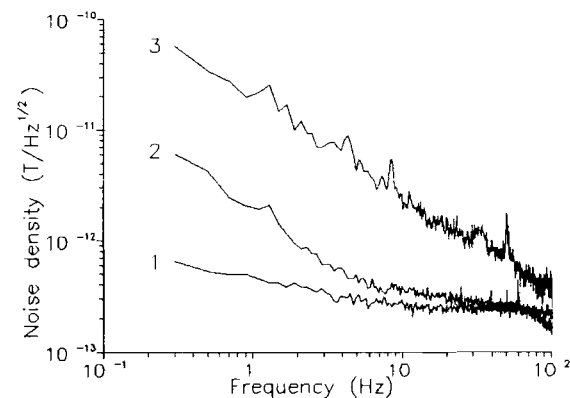


Рис. 5. Спектральные плотности шумов:

- 1 - собственный шум градиентометра в пермаллоевом экране;
- 2 - спектральная плотность шумов на выходе градиентометра в точке снятия магнитокардиограмм;
- 3 - спектральная плотность окружающих шумов в точке снятия магнитокардиограмм, измеренная одним каналом на основе нижнего сквида.

возможно, частично это связано с ростом собственных шумов сквидов, работающих не в нулевом магнитном поле.

Заключение

Отношение сигнал/шум полученных магнитокардиограмм позволяет надеяться на возможность применения градиентометров на ВСП-сквидах в практической диагностике. Кроме того, высокотемпературные сквиды, как показано в [4], имеют значительный запас по чувствительности, и возможно дальнейшее улучшение их параметров, которое, по-видимому, однозначно связано с совершенствованием технологии приготовления керамики. В этом направлении имеются значительные успехи, и поэтому есть основания надеяться, что в недалеком будущем можно будет получить магнитокардиограммы более высокого качества.

НЕТ ЛИ ПРОБЕЛОВ В ВАШЕЙ БИБЛИОТЕКЕ?

Вы можете получить по почте перечисленные ниже книги, если они не были заказаны ранее.

- Литература
1. Б. В. Васильев, В. Н. Полушкин. Магнитометр на основе одноиндуктивного высокотемпературного сквида. Препринт ОИЯИ, 1989, P13-89-85, Дубна, 1989.
 2. Б. В. Васильев и др. Магнитокардиомер на основе одноиндуктивного высокотемпературного сквида. Препринт ОИЯИ, 1989, P13-89-586, Дубна, 1989.
 3. J.E.Zimmerman. SQUID instruments and shielding for low-level magnetic measurements. J.of Appl. Phys., 1977, v.48, №2, p.702-710.
 4. V.N.Polushkin et al. Investigation of $Y_1Ba_2Cu_3O_{7-x}$
 5. R.E.Sarvinski. Superconducting instruments. Cryogenics, 1977, №12, p.671-678.
 6. Е. В. Мейлихов. Диамагнитные свойства ВТСП-керамик. Сверхпроводимость: физика, химия, механика, 1989, т. 2, №9, с. 5-29.

- | | | |
|----------------|---|-------------|
| Д13-84-63 | Труды XI Международного симпозиума по ядерной электронике. Братислава, Чехословакия, 1983. | 4 р. 50 к. |
| Д2-84-366 | Труды 7 Международного совещания по проблемам квантовой теории поля. Алушта, 1984. | 4 р. 30 к. |
| Д1,2-84-599 | Труды VII Международного семинара по проблемам физики высоких энергий. Дубна, 1984. | 5 р. 50 к. |
| Д17-84-850 | Труды III Международного симпозиума по избранным проблемам статистической механики. Дубна, 1984. (2 тома) | 7 р. 75 к. |
| Д11-85-791 | Труды Международного совещания по аналитическим вычислениям на ЭВМ и их применению в теоретической физике. Дубна, 1985. | 4 р. 00 к. |
| Д13-85-793 | Труды XII Международного симпозиума по ядерной электронике. Дубна, 1985. | 4 р. 80 к. |
| Д4-85-851 | Труды Международной школы по структуре ядра. Алушта, 1985. | 3 р. 75 к. |
| Д3,4,17-86-747 | Труды V Международной школы по нейтронной физике. Алушта, 1986. | 4 р. 50 к. |
| -- | Труды IX Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. Дубна, 1984. (2 тома) | 13 р. 50 к. |
| Д1,2-86-668 | Труды VIII Международного семинара по проблемам физики высоких энергий. Дубна, 1986. (2 тома) | 7 р. 35 к. |
| Д9-87-105 | Труды X Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. Дубна, 1986. (2 тома) | 13 р. 45 к. |
| Д7-87-68 | Труды Международной школы-семинара по физике тяжелых ионов. Дубна, 1986. | 7 р. 10 к. |
| Д2-87-123 | Труды Совещания "Ренормгруппа - 86". Дубна, 1986. | 4 р. 45 к. |
| Д4-87-692 | Труды Международного совещания по теории малочастичных и кварк-адронных систем. Дубна, 1987. | 4 р. 30 к. |
| Д2-87-798 | Труды VIII Международного совещания по проблемам квантовой теории поля. Алушта, 1987. | 3 р. 55 к. |
| Д14-87-799 | Труды II Международного симпозиума по проблемам взаимодействия мюонов и пионов с веществом. Дубна, 1987 | 4 р. 20 к. |
| Д17-88-95 | Труды IV Международного симпозиума по избранным проблемам статистической механики. Дубна, 1987. | 5 р. 20 к. |

Рукопись поступила в издательский отдел
6 декабря 1989 года.