

В.К. Корнев¹, И.И. Соловьев², А.В. Шарафиев¹, Н.В. Кленов¹

¹ МГУ имени М. В. Ломоносова

² НИИ ядерной физики имени Д.В. Скобельцына, МГУ имени М.В. Ломоносова

Сверхпроводящие активные электрически малые антенны

Рассматриваются физические основы создания активных электрически малых сверхпроводниковых антенн. Такие антенны основаны на использовании цепочек сверхпроводящих квантовых интерференционных ячеек с высокой линейностью преобразования магнитного сигнала в напряжение. Представлены результаты экспериментального исследования прототипа активной антенны на основе цепочки из 80 ячеек, занимающей площадь $3,3 \times 3,3 \text{ мм}^2$.

Ключевые слова: сверхпроводящие квантовые решетки, активные электрически малые антенны

Введение.

Прогресс в области информационных технологий, систем телекоммуникации и связи зависит не только от совершенствования используемых электронных систем и их элементной базы, но и в сильной степени от появления и развития принципиально новых электронных технологий, базирующихся на новых физических явлениях и принципах. В настоящее время в качестве такой радикально новой технологии выступает сверхпроводниковая электроника, базирующаяся на использовании макроскопических квантовых эффектов в сверхпроводниках. Развитие цифровой сверхпроводниковой электроники, использующей в качестве носителей логической информации одиночные кванты магнитного потока, дало возможность в настоящее время сформулировать новую концепцию развития технологии связи и телекоммуникации, основанную на использовании широкополосных приемных систем с прямой оцифровкой входного сигнала. Наиболее активно такие системы сейчас разрабатываются в научных центрах США и Японии [1-9].

Совершенствование используемой в настоящее время ниобиевой технологии производства сверхпроводниковых интегральных схем с плотностью критического тока джозефсоновских переходов 1 кА/см^2 и $4,5 \text{ кА/см}^2$ [10] позволило реализовать широкополосные сверхпроводниковые аналого-цифровые преобразователи (АЦП), работающие в частотных диапазонах $1 \div 2$, 5 и $7 \div 12$ ГГц, для которых были продемонстрированы предельно низкая шумовая температура, крайне высокая линейность и динамический диапазон до 90 дБ [11-12, 8]. Это дает возможность перехода к созданию широкополосных приемных устройств с прямой оцифровкой входного сигнала. Однако сейчас общая эффективность таких приемных систем на основе сверхпроводниковых АЦП и цифровых систем на основе быстрой одноквантовой логики ограничивается антенной и следующим за ней низкошумящим усилителем, имеющими более высокую шумовую температуру, более низкую линейность и меньший динамический диапазон по сравнению со сверхпроводниковым АЦП.

Решение задачи создания сверхпроводниковых широкополосных высокочувствительных и высоколинейных СВЧ устройств, в которых невозможно

использовать цепь следящей обратной связи, как в хорошо известных низкочастотных устройствах на основе сквидов (SQUID – Superconducting Quantum Interference Device), может быть достигнуто путем использования многоэлементных джозефсоновских структур. Действительно, динамический диапазон последовательной цепочки сквидов, равно как и параллельной цепочки джозефсоновских переходов (с размерами в пределах радиуса взаимодействия), увеличивается с ростом числа N ячеек как \sqrt{N} [13, 14]. При этом требуемая *высокая линейность* функции преобразования магнитного сигнала (магнитной компоненты электромагнитного сигнала) в напряжение может быть достигнута за счет использования в качестве базовых ячеек многоэлементной структуры специально разработанных джозефсоновских цепей с высоколинейным откликом напряжения. Такие многоэлементные структуры могут быть использованы как для создания на их основе высокочувствительных широкополосных усилителей, так и широкополосных активных антенн, обеспечивающих не только прием, но и усиление сигнала.

Таким образом, задачи совершенствования тракта приемной антенны и следующего за ней низкошумящего усилителя могут быть решены одновременно путем создания высокоэффективной антенны *активного* типа, причем антенны *электрически малой*, линейный размер которой много меньше длины волны. При использовании такой *активной антенны*, обеспечивающей достаточно высокую крутизну преобразования принимаемого электромагнитного сигнала в выходное напряжение, выходной сигнал может быть оцифрован непосредственно, без какого-либо предварительного усиления.

Активная электрически малая антенна

Две базовые ячейки, характеризующиеся высокой линейностью отклика напряжения на магнитное поле, были недавно предложены нами и изучены теоретически и экспериментально. Первая ячейка представляет собой так называемый би-сквид, который содержит в себе как двухконтактный, так и одноконтактный сквиды [15]; вторая базовая ячейка представляет собой цепь, состоящую из двух дифференциально включенных параллельных СКИФ (SQIF - Superconducting Quantum Interference Filter [13]), противоположно смещенных магнитным потоком $\delta\Phi$ определенной величины [14].

Интеграция последовательных цепочек разработанных нами базовых ячеек с одним или несколькими сверхпроводящими трансформаторами (концентраторами) потока магнитной компоненты принимаемого электромагнитного сигнала позволяет создавать высокоэффективные электрически малые антенны активного типа. Нами было изготовлено и исследовано несколько прототипов таких антенн. На рис. 1а показана топология одного из таких прототипов активной антенны на основе цепочки из 80 дифференциальных СКИФ-ячеек, конструктивно разделенной на две дифференциально включенных цепочки параллельных СКИФ, которые интегрированы с общим сверхпроводящим трансформатором магнитного потока. Обе цепочки смещены взаимно-противоположно некоторым магнитным потоком $\delta\Phi$. Этот поток задается током I_m , который делится на два одинаковых параллельных тока, протекающих по плечам трансформатора потока, индуктивно связанным с цепочками

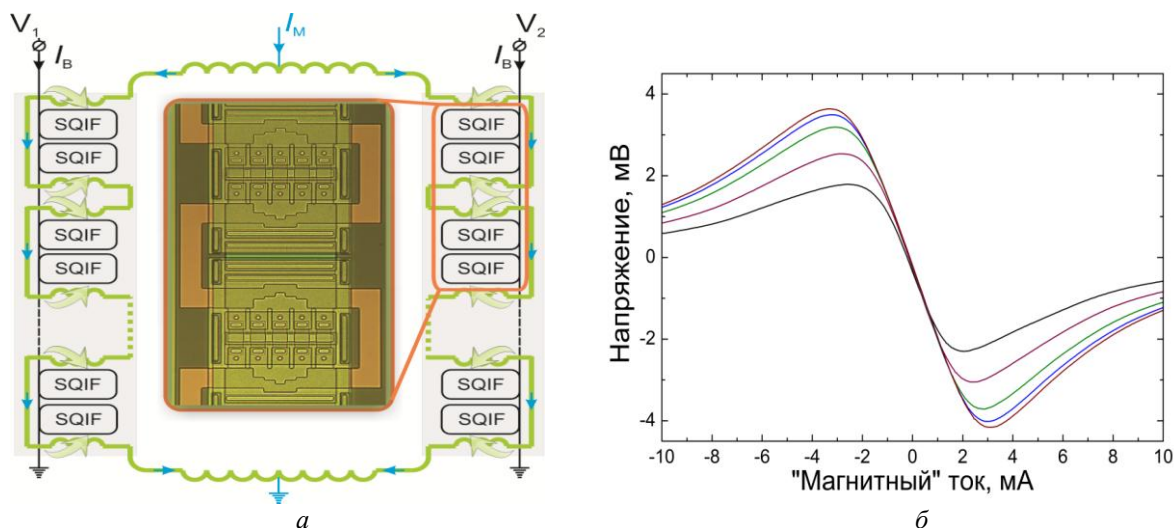


Рис. 1.

СКИФ. На вставке в центре рис. 1а дана фотография фрагмента цепочки, содержащего четыре параллельных СКИФ. Вся интегральная схема размещена на стандартном чипе $5 \times 5 \text{ мм}^2$ с двухрядным расположением контактных площадок по его периметру [16] и занимает оставшуюся доступную площадь $3,3 \times 3,3 \text{ мм}^2$.

На рисунке 1б показано экспериментально измеренное семейство откликов напряжения прототипа антенны при различной величине фрустрирующего магнитного потока $\delta\Phi$. Входной магнитный сигнал задавался путем пропускания «магнитного» тока через окружающий антенну виток, сформированный на этом же чипе. Сохранение высокой линейности отклика во всем использованном диапазоне значений фрустрирующего магнитного потока свидетельствует о том, что форма отклика СКИФ на достаточно большом его участке очень близка к параболическому закону и все дифференциальные отклики этого семейства образованы частями этого параболического отклика СКИФ. Максимальная линейность отклика, измеренная на частоте сигнала 300 кГц, составляла 70 дБ и наблюдалась для амплитуды входного сигнала, использующего в зависимости от величины фрустрирующего магнитного потока от 30% до 80% максимального размаха отклика антенны. Для измерения линейности был использован двух-тоновый метод анализа, согласно которому на вход подаются два гармонических сигнала с одинаковыми амплитудами A_0 и близкими частотами ω_1 и ω_2 , регистрируется спектр выходного сигнала, и линейность вычисляется как отношение амплитуды максимальной комбинационной компоненты $n\omega_1 - m\omega_2$ вблизи основных частот к амплитуде A_0 . На рисунке 2 показан спектр выходного сигнала, полученный при измерении линейности характеристики антенны методом двух-тонового анализа. Крутизна преобразования магнитного сигнала в напряжение, пропорционально увеличивающаяся с ростом числа ячеек в используемой цепочке, для данного прототипа антенны составила около 750 мкТ/мкВ. При формировании антенны на чипе $10 \times 10 \text{ мм}^2$ с доступной площадью $8,7 \times 8,7 \text{ мм}^2$ число ячеек в антенне такого типа может быть увеличено до 220, при этом крутизна преобразования dV/dB увеличится в 5÷6 раз.

Сверхпроводящие квантовые решетки как активные антенны

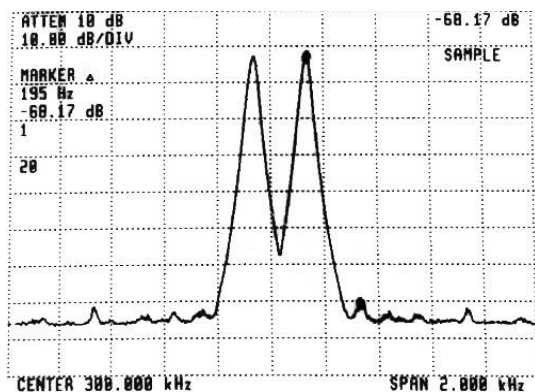


Рис. 2

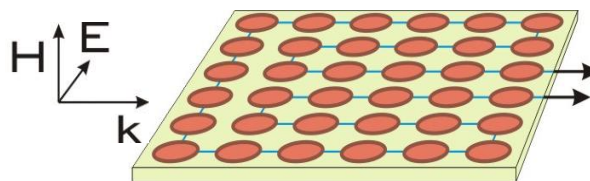


Рис. 3

Эффективность активной антенны с общим сверхпроводящим трансформатором потока или двумя трансформаторами (для каждой из двух дифференциально включенных цепочек) зависит от площади трансформатора, коэффициента трансформации потока в базовые ячейки и числа ячеек в цепочке, располагающейся по общему контуру трансформатора. Крутизна преобразования такой антенны с трансформатором квадратной конфигурации со стороной a должна расти как a^2 , общее число ячеек будет расти пропорционально a , и динамический диапазон будет увеличиваться как \sqrt{a} .

Возможен также другой подход к построению активных антенн, свободный от использования сверхпроводящих трансформаторов потока. В качестве активной антенны могут быть использованы так называемые сверхпроводящие квантовые или решетки - однородные регулярные структуры из сверхпроводниковых ячеек с высоколинейным откликом напряжения (см. рис. 3). В качестве таких ячеек могут быть использованы предложенные нами би-скивды или СКИФ-ячейки. Путем задания соответствующего параллельно-последовательного электрического (не сверхпроводящего) соединения ячеек в этих структурах можно получить как большой динамический диапазон, так и необходимый выходной импеданс. Плотность размещения ячеек будет определять величину приложенной к ячейкам доли потока магнитного сигнала через общую площадь, занимаемую решеткой. Крутизна преобразования такой антенной входного магнитного сигнала в напряжение будет расти с увеличением линейного размера a (при квадратной конфигурации антенны) по-прежнему как a^2 , однако общее число ячеек будет также увеличиваться как a^2 , и, следовательно, динамический диапазон будет расти как a , то есть, значительно быстрее, чем в случае антенны со сверхпроводящим трансформатором магнитного потока.

Отсутствие общего трансформатора потока устраняет также существование между ячейками цепочки дополнительных электрических и магнитных связей, которые, как правило ухудшают степень линейности характеристик системы в целом.

Заключение

Рассмотрены физические основы создания активных электрически малых сверхпроводниковых антенн, основанных на использовании цепочек и решеток

сверхпроводящих квантовых интерференционных ячеек с высокой линейностью преобразования магнитного сигнала в напряжение. Представлены результаты экспериментального исследования прототипа активной антенны на основе цепочки из 80 ячеек, занимающей площадь $3,3 \times 3,3 \text{ мм}^2$.

Использование макроскопических квантовых эффектов в сверхпроводниках открывает уникальные возможности создания высокочувствительных широкополосных электрически малых антенн активного типа для суб-гигагерцового и гигагерцового диапазонов частот. Более того, поскольку характерные частоты джозефсоновских элементов могут лежать в суб-терагерцовой области частот и даже выше, представляется возможным создание высокоэффективных активных антенн в диапазоне десятков гигагерц и выше. Создание таких антенн востребовано для дальнейшего развития широкополосных приемных систем с прямой оцифровкой входного сигнала, отвечающих новой современной концепции развития технологии связи и телекоммуникаций.

Кроме того, ожидаемый прогресс в области технологии формирования интегральных джозефсоновских схем на основе высокотемпературных, в том числе, новых, сверхпроводников позволит в дальнейшем выполнить интеграцию активных сверхпроводниковых антенн с высокоэффективными фильтрами на основе таких сверхпроводников [19] для их использования в базовых станциях сотовой связи.

Библиографический список

- [1] A. Fujimaki, M. Katayama, et al., "Advanced base-station based on superconductive devices and softwaredefined radio technology," *Supercond. Sci. Technol.*, vol.12, p.708–710, 1999.
- [2] E. B. Wikborg, V. K. Semenov, and K. K. Likharev, "RSFQ front-end for a software radio receiver," *IEEE Trans. Appl. Supercon.*, vol. 9, p. 3615–3618, 1999.
- [3] J. Mitola, "Software radio architecture evolution: Foundations, technology tradeoffs, and architecture implications," *IEICE Trans. Commun.*, vol. E83-B, pp. 1165–1173, 2000.
- [4] D.K. Brock, O.A. Mukhanov, and J. Rosa, "Superconductor digital RF development for software radio," *IEEE Commun. Mag.*, vol.39, no.2, p.174–179, 2001.
- [5] J. Wong, R. Dunnegan, D. Gupta, et al., "High Performance, All Digital Rf Receiver Tested at 7.5 Gigahertz," *Military Communications Conference, 2007 (MILCOM 2007)*. IEEE Digital Object Identifier: 10.1109/MILCOM.2007.4455052, p. 1-5, 2007.
- [6] O. A. Mukhanov, D. Kirichenko, I. V. Vernik, et al., "Superconductor Digital-RF Receiver Systems," *IEICE Trans. Electron.*, Vol. E91–C, No.3, p.306-317, 2008.
- [7] D. E. Kirichenko, T. V. Filippov, and D. Gupta, "Microwave Receivers with Direct Digitization," *Microwave Symposium Digest*, p. 1449 – 1452, 2009.
- [8] I. V. Vernik, D. E. Kirichenko, et al., "Progress in the Development of Cryocooled Digital Channelizing RF Receivers," *IEEE Trans. Appl. Supercon.*, vol. 19, p. 1016-1021, 2009.
- [9] D. Gupta, D. E. Kirichenko, V. V. Dotsenko, R. Miller, et al., "Modular, Multi-function Digital-RF Receiver Systems," *IEEE Trans. Appl. Supercon.*, vol. 21, p. 883-890, 2011.
- [10] D. Yohannes, S. Sarwana, et al., "Characterization of HYPRES' 4.5 kA/cm^2 & 8 kA/cm^2 Nb/AlOx/Nb Fabrication Processes", *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 15, no.2, p. 90-93, 2005.
- [11] O. Mukhanov, D. Gupta, A. Kadin, and V. Semenov, "Superconductor Analog-to-Digital Converters," *Proc. of the IEEE*, vol. 92, p. 1564-1584, Oct. 2004.
- [12] A. Inamdar, S. Rylov, et al., "Progress in Design of Improved High Dynamic Range Analog-to-Digital Converters," *IEEE Trans. Applied Superconductivity*, vol. 19, no. 3, p. 670-675, 2009.
- [13] J. Oppeländer, Ch. Häussler, T. Träuble and N. Schopohl, "Sigmoid like flux to voltage transfer function of superconducting quantum interference filter circuits" *Physica C: Superconductivity*, 368(1-4): 125-129, 2002.
- [14] И.И.Соловьев, В.К.Корнев, Н.В.Кленов, О.А. Муханов "Сверхпроводниковые джозефсоновские структуры с высокой линейностью преобразования магнитного сигнала в напряжение" *ФТТ*, 52, 11, 2010

- [15] V. K. Kornev, I. I. Soloviev, et al., "Bi-SQUID - Novel Linearization Method for dc SQUID Voltage Response", *Superconductor Science and Technology (SUST)*, vol. 22, pp. 114011-1-6., 2009.
- [16] V. K. Kornev, I. I. Soloviev et al., "Progress in High Linearity Multi-Element Josephson Structures", *Physica C*, vol. 470, pp. 886-889, 2010.
- [17] V. K. Kornev, I. I. Soloviev, et al., "Design and Experimental Evaluation of SQIF Arrays with Linear Voltage Response," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 21, no. 3, part 1, pp. 394- 398, 2011.
- [18] HYPRES Design Rules. Available: <http://www.hypres.com/>
- [19] S. Ohshima, "High-temperature superconducting passive microwave devices, filters, and antennas," *Supercond. Sci. Technol.*, vol. 13, p. 103-108, 2000.