

# АЛГОРИТМЫ ОБРАБОТКИ И СХЕМНЫЕ РЕШЕНИЯ

УДК 621.385.6

В. Ф. ОЛЕЙНИК, д-р техн. наук, В. П. ПАВЛОВ, П. П. ПАВЛОВ,  
В. В. ПОПОВСКИЙ, д-р техн. наук

## ПРИМЕНЕНИЕ СВЕРХПРОВОДИМОСТИ В ПРИЕМНЫХ УСТРОЙСТВАХ

Криоэлектроника и сверхпроводимость обеспечили значительный прогресс в области приема и обработки сигналов во всех диапазонах радиоволн. Так, уменьшение коэффициента шума приемника способствует повышению энергетики линии радиосвязи, увеличению дальности связи на интервале. Использование сверхпроводимости кроме того позволяет уменьшить омические потери и, что особенно важно, повысить добротность входных цепей радиоприемников. Это дает возможность перенести задачу обеспечения избирательности из тракта промежуточных частот в тракт преселектора и усилителя рабочей частоты. Оптимальным будет предложение использовать на входе приемника узкополосный преселектор, обладающий добротностью несколько десятков тысяч, что позволит ограничить полосу принимаемых частот пределами спектра полезного сигнала. Кроме того, уменьшение полосы частот преселектора позволит уменьшить мощность внешних принимаемых шумов:

$$P_{ш} = N_{ш} k \cdot T_0 \cdot \Delta F, \quad (1)$$

где  $N_{ш}$  – коэффициент шума,  $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$  Дж/град – постоянная Больцмана,  $T_0$  – температура окружающей среды,  $\Delta F$  – шумовая полоса.

Еще одно положительное качество, которое при этом приобретается, что особенно важно для приемников КВ диапазона, где внешние шумы преобладают, оно сводится к резкому уменьшению интермодуляционных помех, поскольку частоты всех близких сторонних станций примыкающих к полезному сигналу оказываются за пределами полосы полезного сигнала.

В дополнение к узкополосному преселектору в качестве усилительного элемента может быть использован сверхпроводящий квантовый интерференционный датчик СКВИД – уникальный прибор, не имеющий аналогов среди элементов теплой электроники.

Такой криогенный сверхпроводниковый приемник обладает уникальными рекордными характеристиками по чувствительности, избирательности и динамическому диапазону. Его естественно дополнить сверхпроводящими элементами антенной техники, обладающими минимальными активными потерями, имеющими минимальные размеры, позволяющими сохранять уровень соотношения сигнал/шум, что особенно важно в случае, когда внешние шумы превалируют над внутренними. В этом случае удастся минимизировать полную температуру шума приемного устройства  $T_{ш.пр.у.}$ , которая определяется суммарной температурой всех элементов этого устройства:

$$T_{ш.пр.у.} = T_{ш.пр.} + T_0 (1 - \eta_{\phi}) + (T_{ш.А.внутр.} + T_{ш.А.внешн.}) \eta_{\phi}, \quad (2)$$

где  $T_{ш.пр.}$  – шумовая температура приемника,  $T_0$  – температура окружающей среды,  $\eta_{\phi}$  – КПД фидера и согласующих элементов,  $T_{ш.А.внутр.}$  – шумовая температура, обусловленная активными потерями в антенне,  $T_{ш.А.внешн.}$  – шумовая температура антенны, обусловленная внешними источниками шумов.

Рассмотрим более подробно отдельные элементы сверхпроводникового приемника.

### Электрически малые антенны

Электрически малые антенны получили широкое распространение в современных системах связи.

К электрически малым антеннам (ЭМА) относятся антенны с геометрическими размерами меньше половины длины волны  $\lambda/2$ , принимаемых колебаний. По определению [1], ЭМА – это антенны, для которых выполняется соотношение

$$k \cdot a \leq 1, \quad (3)$$

где  $k = 2\pi/\lambda$  – волновое число,  $\lambda$  – длина волны,  $a$  – радиус условной сферы, охватывающий максимальный размер антенны.

Оценим основные параметры двух разновидностей электрически малых антенн – электрической антенны (короткий штырь над проводящей поверхностью или диполь) и магнитной антенны (малая рамочная антенна), при выполнении элементов этих антенн из обычных хорошо проводящих материалов и сравним их качественные показатели при применении высокотемпературных сверхпроводников ВТСП.

Будем исходить из того [2 - 5], что у диполя длиной  $l < \lambda/2$  сопротивление излучения

$$R_{изл.} = 20\pi^2 (l/\lambda)^2. \quad (4)$$

Сопротивление излучения для круглой рамки с периметром  $l$  определяется выражением

$$R_{изл.} = 20\pi^2 (l/\lambda)^4. \quad (5)$$

Эффективность работы антенны зависит не только от сопротивления собственных потерь антенны  $R_{пот. ант.}$ , но и от активного сопротивления потерь  $R_{согл.}$  в элементах применяемых для согласования и компенсации реактивного сопротивления антенны (см. рис. 1).

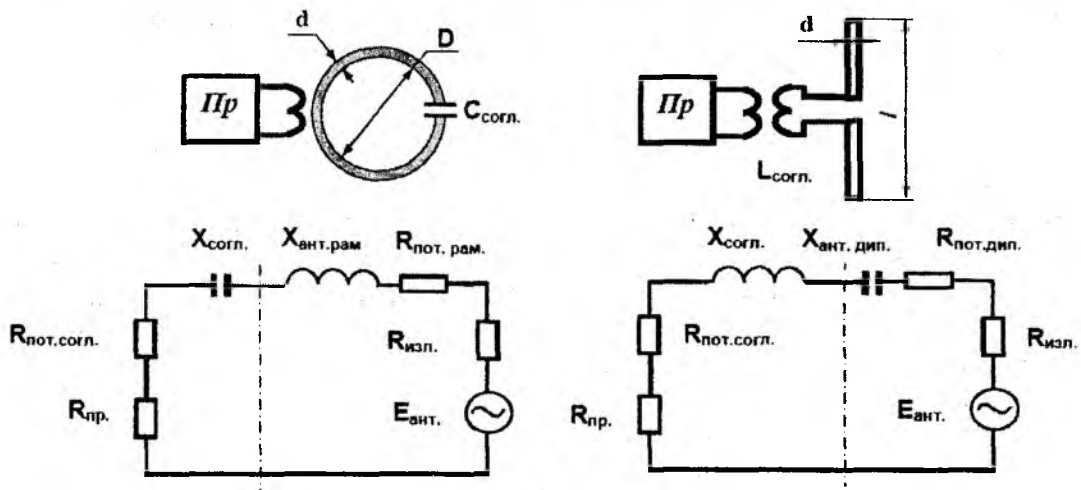


Рис. 1

Активное сопротивление потерь для рамочной антенны, имеющей периметр  $l$ , с учетом скин-эффекта

$$R_{пот.рам.} = 1,44(l/\lambda) \frac{\sqrt{\lambda}}{d} \sqrt{\frac{\rho\mu_r}{\rho_m}}, \quad (6)$$

где  $d$  – диаметр проводника (мм),  $\mu_r$  – относительная проницаемость материала антенны,  $\rho$  и  $\rho_m$  – удельные сопротивления материала антенны и меди соответственно.

Соответствующее активное сопротивление потерь для дипольной антенны с длиной  $l$  составляет

$$R_{пот.дип.} = \frac{R_{пот.рам.}}{3}. \quad (7)$$

Активные потери в элементах согласования зависят от их параметров и добротностей:

$$R_{пот.согл.} = |X_{ант.}| / Q_{согл.}, \quad (8)$$

где  $|X_{ант.}|$  – реактивная составляющая полного входного сопротивления антенны, имеющая емкостный характер для диполя и индуктивный для рамки, причем в случае одновитковой рамки  $|X_{ант.рам.}| < |X_{ант.дип.}|$ .

Элемент согласования предназначен для обеспечения последовательного резонанса в антенном контуре, при котором выполняется условие:  $(X_{ант.} + X_{согл.}) = 0$ .

Реальные добротности для согласующих элементов диполя и рамки в КВ диапазоне с учетом частоты настройки находятся в пределах  $Q_{согл.} \approx 100...300$ . Реактивные сопротивления для диполя  $X_{ант.дип.}$  и одновитковой рамки  $X_{ант.рам.}$  можно определить по формулам:

$$X_{ант.дип.} = \frac{-120 \ln(2 \cdot l/d - 0,69)}{\text{tg}(2\pi \cdot l/\lambda)}, \quad (9)$$

$$X_{ант.рам.} = 377(l/\lambda)[\ln(2,54 \cdot l/d) - 2]. \quad (10)$$

Проведем расчеты для заданных геометрических размеров ЭМА дипольного и рамочного типа антенн изготовленных из меди, работающих в коротковолновом диапазоне частот по приведенным формулам (4) – (10) см. табл. 1 и 2.

Таблица 1

Параметры ЭМА дипольного типа

Длина волны $\lambda$ , м	80, 40	40, 30, 20	20, 17, 15, 10
Длина диполя $l$ , м	2	1	0,5
Относительная длина антенны $l/\lambda$	0,025-0,05	0,025-0,05	0,025-0,05
Диаметр проводника $d$ , мм	8	4	2
Интервал частот, МГц	3,75-7,5	7,5-15	15-30
Сопротивление излучения $R_{изл.}$ , Ом	0,123-0,494	0,123-0,494	0,123-0,494
Потери в антенне $R_{пот.ант.}$ , Ом	0,013-0,019	0,019-0,027	0,027-0,038
Реактивное сопротивление $X_{ант.дип.}$ , Ом	4192-2108	4192-2108	4192-2108
Добротность цепей согласования $Q_{согл.}$	300	200	100
Потери в цепях согласования $R_{пот.согл.}$ , Ом	13,97-7,02	20,96-10,54	41,92-21,08

Таблица 2

Параметры ЭМА рамочного типа.

Длина волны $\lambda$ , м	80, 40	40, 30, 20	20, 17, 15, 10
Диаметр кольца $D$ , м	1	0,5	0,25
Периметр кольца $l$ , м	3,14	1,57	0,785
Относительная длина антенны $l/\lambda$	0,04-0,08	0,04-0,08	0,04-0,08
Диаметр проводника $d$ , мм	8	4	2
Интервал частот, МГц	3,75-7,5	7,5-15	15-30
Сопротивление излучения $R_{изл.}$ , Ом	0,0005-0,008	0,0005-0,008	0,0005-0,008
Потери в антенне $R_{пот.рам.}$ , Ом	0,064-0,09	0,09-0,129	0,129-0,182
Реактивное сопротивление $X_{ант.рам.}$ , Ом	74-148	74-148	74-148
Добротность цепей согласования $Q_{согл.}$	300	200	100
Потери в цепях согласования $R_{пот.согл.}$ , Ом	0,25-0,5	0,37-0,74	0,74-1,48

Оценим КПД ЭМА дипольного и рамочного типа при работе, как в режиме приема, так и передачи сигнала. КПД антенны  $\eta_{ант.}$  зависит не только от сопротивления собственных потерь антенны  $R_{пот.ант.}$ , но и от сопротивления потерь  $R_{пот.согл.}$  в элементах согласования и компенсации реактивного сопротивления:

$$\eta_{ант.} = \frac{R_{изл.}}{R_{изл.} + R_{пот.ант.} + R_{пот.согл.}} \times 100\%. \quad (11)$$

По данным табл. 1 и 2 КПД ЭМА дипольного типа изготовленной из меди находится в пределах:  $\eta_{\text{ант.дип.}} \approx 0,3\% - 2,3\%$ , мала также и эффективность медной рамочной антенны ее к.п.д. составляет:  $\eta_{\text{ант.дип.}} \approx 0,04\% - 1,3\%$ .

Такая малая эффективность ЭМА в основном связана с большими потерями в элементах согласования и большими собственными потерями, так как они намного превышают значение сопротивления излучения.

Кардинально уменьшить эти потери и значительно расширить частотный диапазон позволяет использование высокотемпературных сверхпроводящих (ВТСП) материалов с низким поверхностным сопротивлением.

Первая реализации дипольной антенны на ВТСП-материале была предпринята в 1989 г. специалистами Бирмингемского университета [6]. Антенна и согласующая схема, изготовленные из  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ -керамической проволоки, были размещены на подложке из полимерного материала марки Tufnol. Сравнение рабочих характеристик дипольных антенн из меди и ВТСП-керамики показало, что коэффициент усиления антенны из ВТСП-материала, охлажденной до температуры жидкого азота (77 К), превышает усиление медной антенны при комнатной температуре на 12 дБ, а ее усиление при температуре жидкого азота – на 6 дБ.

В последующих исследованиях [7 - 9] были получены ВТСП пленки, на базе которых были созданы резонансные контуры с добротностью 15000 - 64000 для работы в диапазоне частот от 5 до 35 МГц. Применение пленок с такими параметрами позволяет снизить потери в ЭМА и согласующих элементах примерно в 200 - 300 раз.

С учетом этого снижения потерь, исходя из данных табл. 1 и 2 оценим эффективность ЭМА дипольного и рамочного типа, в случае изготовления их из ВТСП материалов, работающих при охлаждении до температуры жидкого азота.

В этом случае КПД для ЭМА дипольного типа будет составлять:  $\eta_{\text{ант.}} \approx 47\% - 98\%$ , возрастет также и эффективность рамочной антенны ее КПД будет находиться в пределах:  $\eta_{\text{рам.}} \approx 24\% - 74\%$ .

Таким образом, применение ВТСП в элементах ЭМА повышает их эффективность в десятки раз и полностью себя оправдывает, так как сводит на нет вклад шумов связанных с элементами согласования или фидером.

### Преселектор с ВТСП ЭМА и усилителем на СКВИДе

Полная энергия, извлекаемая антенной из электромагнитного поля радиоволны [10] определяется соотношением для полной мощности  $P_{\text{полн.}}$ :

$$P_{\text{полн.}} = \frac{(Eh_0)^2}{R_{\text{пр.}} + R_{\text{изл.}} + R_{\text{ном.}}}, \quad (12)$$

где  $E$  – напряженность поля радиоволны в  $\text{в/м}$ ,  $h_0$  – действующая высота антенны  $m$ ,  $R_{\text{изл.}}$  – сопротивление излучения антенны,  $R_{\text{ном.}}$  – сопротивление потерь в антенне,  $R_{\text{пр.}}$  – активное входное сопротивление приемника.

Часть, пропорциональная величине  $\frac{R_{\text{пр.}}}{R_{\text{изл.}} + R_{\text{ном.}} + R_{\text{пр.}}}$  этой полной энергии, выделяется на входном сопротивлении приемника.

Максимальное количество энергии, которое можно теоретически извлечь при данной антенне из поля радиоволн, получается тогда, когда полное сопротивление потерь  $R_{\text{ном.}} + R_{\text{пр.}}$  равно сопротивлению излучения  $R_{\text{изл.}}$ . При этом условии извлекаемая приемной антенной энергия максимальна и равна  $\frac{(Eh_0)^2}{4R_{\text{изл.}}}$ . Для сверхпроводящих антенных устройств и согла

ствующих элементов сопротивлением потерь в антенне можно пренебречь, в силу этого условие согласования выполняется при  $R_{изл.} = R_{пр.}$ .

Учитывая, что ЭМА обладают малым сопротивлением излучения, целесообразно иметь в качестве приемного устройство с малым входным сопротивлением и минимальным собственным шумом.

Всем этим требованиям в полной мере соответствуют радиочастотные усилители на СКВИДах, чувствительность которых находится на квантовом уровне. Они имеют шумовую температуру близкую к квантовому пределу  $T_N = hf/k$ , где  $f$  – частота сигнала,  $h$  и  $k$  – постоянные Планка и Больцмана соответственно.

Известны одноконтатные ВЧ-СКВИДы смещаемые высокочастотным напряжением с помощью индуктивно связанного с ними резонансного контура и двухконтатные ПТ-СКВИДы, смещаемые постоянным током.

Использование ПТ-СКВИДа в качестве усилителя основано на следующем явлении. Если ПТ-СКВИД рассматривать как параметрический усилитель, то роль источника накачки играет переменное напряжение, возникающее на контакте Джозефсона в присутствии постоянного смещающего напряжения  $U$  (нестационарный эффект Джозефсона). Частота этого напряжения  $\omega_c = 2eU/h$ , где  $e$  – заряд электрона,  $h$  – постоянная Планка. Ток частоты  $\omega_c$  модулируется частотой  $\omega$  измеряемого сигнала, что в свою очередь вызывает модуляцию напряжения  $U$  на джозефсоновском переходе. Идеальное параметрическое усиление характеризуется соотношением  $G_{усл.} = \omega_c / \omega$ . Значение множителя  $2e/h$  в выражении для джозефсоновской частоты равно  $483 \text{ МГц/мкВ}$ . Отсюда следует, что при типичном смещении на переходе в несколько десятков микровольт могут быть получены очень высокие частоты накачки.

С учетом сверхнизкого уровня шумов, характерного для ПТ-СКВИДов, радиочастотные усилители на их основе имеют уникальные параметры [11 - 13]. Так усилители на СКВИДах обладают рекордным значением шумовой температуры  $50 \text{ мК}$  на частоте  $500 \text{ МГц}$  и близки по своим шумовым параметрам к квантовому пределу.

Поэтому несомненный интерес представляют охлаждаемые приемники с использованием СКВИДов в сочетании со сверхпроводящими резонансными цепями. Эквивалентная схема преселектора приемника с ВТСП ЭМА и с усилителем на ПТ-СКВИДе представлена на рис. 2.

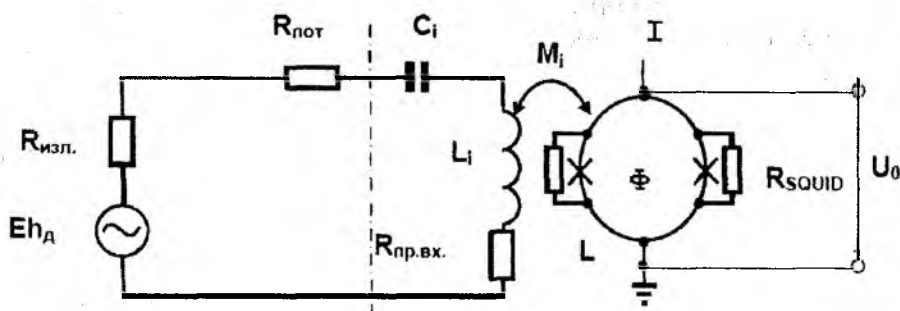


Рис. 2

Входное сопротивление приемника на СКВИДе

$$R_{пр.вх.} = \omega^2 M_i^2 / R_{SQUID}. \quad (13)$$

Для типичных параметров СКВИДа  $M_i \approx 2 \text{ нГн}$  и  $R_{SQUID} \approx 80 \text{ ом}$  на частоте  $20 \text{ МГц}$  входное сопротивление приемника  $R_{пр.вх.} \approx 0,008 \text{ ом}$ , что совпадает с одним из значений сопротивления излучения ЭМА рамочного типа  $R_{изл.}$ , приведенным в табл. 1 и 2, и показывает возможность их полного согласования для обеспечения условия максимального извлечения энергии из электромагнитного поля радиоволн. Данное условие может быть легко выполнено и для других значений сопротивления излучения из табл. 1 и 2. Этот факт свидетельствует о

том, что применение ВТСП в элементах согласования и усиления позволяет эффективно использовать даже сверхмалые ЭМА с весьма малым сопротивлением излучения.

Расчетная величина шумовой температуры для заданного СКВИДа, работающего при температуре 77 К составляет примерно 30 К и соответствует шумовой температуре предлагаемого приемника  $T_{ш.пр.} \approx 30$  К

Нами было показано, что потери в сверхпроводящей антенне и согласующих цепях чрезвычайно малы, а также мала шумовая температура входного усилительного каскада приемника на СКВИДе, в силу этого полная температура шума сверхпроводящего приемного устройства практически определяется внешними источниками шумов. А именно эти шумы эффективно подавляются уменьшением полосы пропускания сверхпроводящего преселектора до полосы полезного сигнала  $\Delta F \approx 1 \div 10$  кГц, чем обеспечивается качественный прием в условиях действия помех и доказывает эффективность сверхпроводящих приемников.

### Усилители и антенны СВЧ диапазона

Рассмотрим некоторые аспекты возможности применения сверхпроводимости для реализаций приемных и антенных устройств в СВЧ диапазоне. К недостаткам радиочастотных усилителей на СКВИДах следует отнести относительно малый динамический диапазон, связанный с периодичностью их вольт-полевой характеристики (ВПХ) (см. рис. 3).

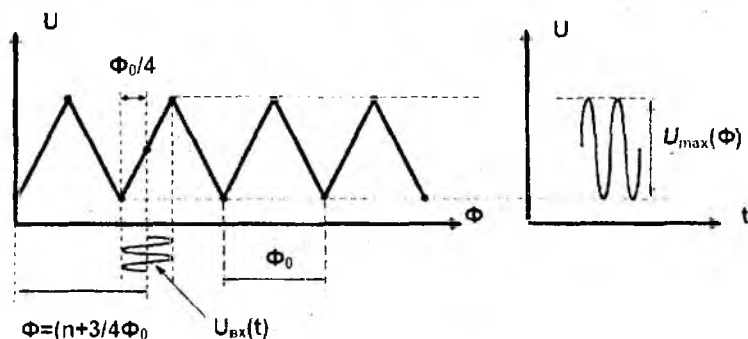


Рис. 3

Обычно его удается устранить за счет применения отрицательной обратной связи, что эффективно действует до частот порядка нескольких десятков МГц. На более высоких частотах за счет увеличения полосы пропускания возрастают шумы, поступающие на вход СКВИДа через цепь обратной связи, что приводит к сбоям в работе системы.

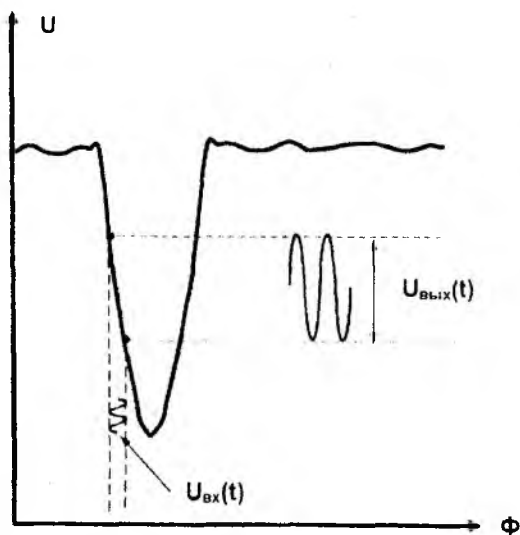


Рис. 4

Недавно это ограничение было преодолено за счет использования оригинальной идеи квантового интерференционного фильтра СКИФа (SQIF) [14 - 15].

СКИФ это матрица, состоящая из квантовых интерферометров (включенных параллельно, последовательно или параллельно – последовательно) с нетрадиционной многоэлементной структурой.

Отклик напряжения СКИФ характеризуется единственным острым пиком, высота которого зависит от количества последовательно включенных интерферометров.

Вольт-полевая характеристика СКИФа показана на рис. 4.

Вопреки обычной оптической дифракционной решетке, которая проявляет свои уни-

кальные свойства из-за строгой периодичности ее структуры, результат уникальных свойств СКИФ напротив связан с нетрадиционной непериодической структурой матрицы интерферометров. СКИФ представляет собой цепочку СКВИДов, в которой площади квантования отдельных интерферометров распределены случайным образом.

В случае последовательного СКИФ состоящего из  $N$  квантовых интерферометров напряжение тепловых шумов в такой последовательной структуре пропорционально корню квадратному из  $N$ , в то время как амплитуда напряжения отклика  $U_{\max}(\Phi)$  и крутизна преобразования  $B = \partial U / \partial \Phi$  пропорциональны  $N$ . Это означает, что динамический диапазон  $D = U_{\max}(\Phi) / U_{\text{ш}}$  увеличивается как  $N^{1/2}$ .

В случае параллельного СКИФ с учетом отсутствия индуктивной связи ( $I = 0$ ), динамический диапазон также пропорционален квадратному корню из числа подсоединенных интерферометров. Фактически, величина напряжения тепловых помех  $U_{\text{ш}}$  для  $N$  параллельных интерферометров уменьшается как корень квадратный из  $N$ , в то время как амплитуда напряжения отклика  $U_{\max}(\Phi)$  и крутизна преобразования  $B = \partial U / \partial \Phi$  остается постоянной. СКИФ обладает широкополосной частотной характеристикой от постоянного тока до приблизительно  $0,1 \omega_c$ , где  $\omega_c \approx 50 \text{ ГГц}$  – характерная Джозефсоновская частота. Представляет интерес структура СКИФ из параллельно последовательно соединенных интерферометров, которая обеспечивает не только увеличение динамического диапазона, но и изменение в широком диапазоне ее входного импеданса.

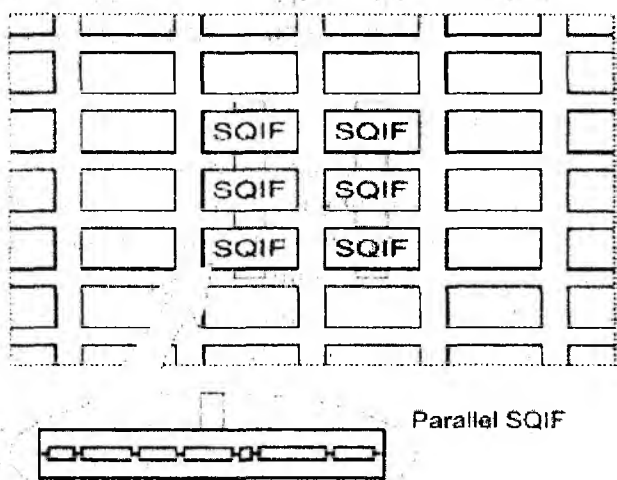


Рис. 5

Предложенная двумерная структура может также использоваться как активная электрически малая антенна [16].

На рис. 5 представлена активная электрически малая антенна на базе дифференциальной последовательно-параллельной СКИФ-структуры.

Предположительно эффективность такой антенны может быть значительно увеличена, за счет применения параболического рефлектора для фокусировки потока радиоизлучения.

Максимальное усиление СКВИДа определяется соотношением между джозефсоновской частотой и частотой сигнала:

$$G_{\text{увл.}} \leq \omega_c / \omega.$$

Дальнейшее совершенствование усилителей на СКВИДах связано с применением высокотемпературных сверхпроводников в джозефсоновских переходах работающих при температуре жидкого гелия  $T = 4,2 \text{ К}$ , что может позволить как минимум на порядок увеличить джозефсоновскую частоту  $\omega_c$  и расширить область практического использования усилительных сверхпроводящих устройств.

Как известно эффективная работа антенных устройств, фильтров, и согласующих устройств в области высоких частот напрямую зависит от потерь, связанных с наличием скин-эффекта в проводящих материалах, из которых они изготавливаются, особенно это важно для СВЧ диапазона [17].

Основная часть высокочастотного тока течет в поверхностном слое металла толщиной:

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega \mu_0 \sigma}}, \quad (11)$$

где  $\omega = 2\pi \cdot f$ ,  $\mu_0 = 4\pi 10^{-7} \text{ Гн/м}$  – магнитная проницаемость вакуума,  $\sigma$  – удельная проводимость металла.

В этом случае сопротивление единицы площади металла:

$$R_n = \frac{1}{\sigma \cdot \delta} = \sqrt{\frac{\omega \mu_0}{2\sigma}} \quad (12)$$

Для сверхпроводников, исходя из двухжидкостной модели, поверхностное сопротивление определяется соотношением

$$R_n = \frac{\omega^2 \mu_0^2 \lambda^3 \sigma \cdot n_N}{2n} \quad (13)$$

где  $\lambda$  – лондоновская глубина проникновения,  $n_N$  – плотность нормальных электронов,  $n$  – плотность электронов.

При температуре жидкого азота 77К ВТСП имеют значительно меньшие значения поверхностного сопротивления, чем традиционные материалы электроники.

В силу различных частотных зависимостей поверхностного сопротивления для нормально проводящих материалов  $R_p < f^{1/2}$  и сверхпроводников  $R_p < f^2$  этот выигрыш можно получить только на частотах ниже частоты, где становятся равными сопротивления обычного проводника и сверхпроводника. В частности для пленки высокотемпературного сверхпроводника  $Tl_2Ba_2CaCu_2O_8$  [18], это происходит на частоте порядка 150 ГГц.

А это значит, что фактически до этой частоты использование сверхпроводящих пленок может в значительной степени снизить потери полезного сигнала.

Таким образом, антенные и другие устройства, изготовленные из высокотемпературных сверхпроводящих пленок, будут иметь существенно лучшие характеристики по сравнению с традиционными из обычных хорошо проводящих материалов.

### **Другие приложения сверхпроводниковой электроники**

Пример применения сверхпроводимости в антенных и приемных устройствах далеко не исчерпывает возможностей криогенной электроники. Сверхпроводниковая электроника динамично прогрессирующее направление электроники. Благодаря этому постоянно растет число электронных приборов, в которых успешно используется явление сверхпроводимости.

Многочисленный состав устройств сверхпроводниковой электроники условно разделяют на три области: пассивные сверхпроводящие элементы, аналоговые устройства на СКВИДах и цифровую технику с применением джозефсоновских контактов.

В настоящее время создан широкий спектр пассивных СВЧ устройств: линии передач, линии задержек, полосовые фильтры, амплитудные и фазовые модуляторы, переключатели и ограничители СВЧ мощности, малогабаритные антенны как приемные, так и передающие, резонаторы, перестраиваемые преселеторы и др. [19]. Использование сверхпроводимости в пассивных устройствах приводит к уменьшению потерь, снижению дисперсии сигнала и облегчению управления их параметрами. На сегодняшний день для базовых станций сотовой связи созданы ВТСП полосовые фильтры СВЧ диапазона с уникальными характеристиками. Они имеют потери на проход менее 0,5 дБ, затухание вне полосы 85 дБ, крутизну склонов частотной характеристики 100 дБ/МГц. Кроме того, созданы системы, перестраиваемых ВТСП-фильтров для локационной техники.

Большие успехи достигнуты в разработке и практическом использовании аналоговых устройств на СКВИДах и эффекте Джозефсона. Приведем некоторые из них: приемники субмиллиметрового диапазона волн, параметрические усилители, усилители и активные антенны на СКИФ, генераторы, преобразователи частоты, детекторы и т.д.

Широкое применение в миллиметровом и субмиллиметровом диапазоне получили сверхпроводниковые приемные устройства на основе квантовых смесителей СИС (сверхпроводник-изолятор-сверхпроводник). Предельная чувствительность таких устройств ограничена только квантовым пределом  $hf/k$ , причем в настоящее время шумовая температура практических устройств лишь в 3 – 5 раз превосходит этот предел. Так, например, шумовая температура лучших СИС приемников на частоте порядка 500 ГГц составляет 60 - 100 К, что на порядок меньше, чем у приемников на основе диодов с барьером Шоттки [20].

В разных обсерваториях мира уже используются как матричные гетеродинные приемники на СИС для спектральных измерений, так и матричные болометрические приемники на основе изменения сопротивления в сверхпроводящих тонких пленках при переходе пленки из сверхпроводящего в нормальное состояние (TES bolometers). Информация с болометров считывается при помощи СКВИДов. Такие приемники превосходят полупроводниковые по чувствительности и быстродействию. На их основе создана субмиллиметровая видеокамера с разрешением 10000 пикселей [21, 22].

Криогенные усилители радиочастотного диапазона обладают рекордными значениями шумовой температуры  $T_{ш} = 50 \text{ мК}$ . Эта шумовая температура примерно в 40 раз меньше, чем при использовании самых лучших охлаждаемых полупроводниковых усилителей с высокой подвижностью носителей [23].

В области цифровой сверхпроводящей электроники продолжает развиваться новая технология цифровых устройств на основе быстрой одноквантовой логики (БОКЛ или в английской транскрипции: RSFQ – rapid single flux quantum). Преимущество таких структур связано с малой диссипацией энергии, она пренебрежимо мала и составляет  $10^{-18} \text{ Дж/бит}$  [24,25].

В качестве примера можно указать базовый элемент телекоммуникационных коммутаторов для сетей асинхронного режима передачи (АТМ), а именно – коммутатор цифровых последовательных каналов с двумя входами и двумя выходами. Изготовленный с использованием технологии GaAs, такой коммутатор потребляет  $10 \text{ Вт}$  на частоте  $10 \text{ ГГц}$ . Нетрудно подсчитать, что для коммутации, скажем, 1024 каналов с суммарной пропускной способностью в 1 терабайт в секунду потребуется мощность  $500 \text{ кВт}$ .

О привлекательности RSFQ говорит, например, такой факт: рекордная экспериментально измеренная тактовая частота сверхпроводящего Т-триггера, разработанного в Университете штата Нью-Йорк в США, составляет  $750 \text{ ГГц}$  при потребляемой мощности всего в  $0,1 \text{ мВт}$ .

Так, сверхпроводящий переключатель на несколько сот каналов будет потреблять пару сотен  $\text{Вт}$ , включая систему охлаждения. К тому же основная мощность будет выделяться не внутри схем, а на горячем конце рефрижератора, откуда не составит проблем ее отвести.

В настоящее время разрабатываются сверхпроводящий цифровой маршрутизатор для высокоскоростной передачи данных до  $160 \text{ ГГц}$ . Поскольку Интернет-трафик растет экспоненциально, то для решения этой задачи могут быть успешно применены сверхпроводниковые технологии.

К настоящему времени известно о создании сложных RSFQ-схем, например, таких, как 16-разрядный аналого-цифровой преобразователь (АЦП) или 16-канальный автокоррелятор для применений в радиоастрономии с тактовой частотой  $f_T \approx 20 \text{ ГГц}$  [26].

Ограниченное применение сверхпроводимости связано с необходимостью обеспечить охлаждение элементов криогенной электроники. Для низкотемпературных сверхпроводников это температура жидкого гелия –  $4,2 \text{ К}$ , а для ВТСП – это жидкий азот –  $77 \text{ К}$ .

Благодаря развитию криогенной техники в последнее время созданы компактные, с большим ресурсом микроохладители, надежность которых приближается к надежности домашнего холодильника, это позволило создать целый ряд уникальных радиоэлектронных устройств со сверхпроводящими элементами, которые успешно используются в науке и технике.

В 1986 г. была открыта высокотемпературная сверхпроводимость при этом температура сверхпроводника составляла чуть больше  $30 \text{ К}$ . Благодаря усиленному интересу научного сообщества к ВТСП уже в 1988 г. был создан сверхпроводник с критической температурой  $T_c = 125 \text{ К}$ , а в 1993 – с  $T_c = 138 \text{ К}$  этот рекорд был достигнут для соединения  $\text{HgBa}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{8+d}$  он продержался до 2008 г. В последние годы заметно усилился поиск новых сверхпроводящих систем, и была теоретически показана [27] возможность получения ВТСП со значениями  $T_c > 150 \text{ К}$  вплоть до комнатных температур.

В январе 2009 г. была заявлена критическая температура для ВТСП соединения  $(\text{Sn}_3\text{In})\text{Ba}_4\text{Ca}_2\text{Cu}_1\text{O}_y$  на уровне  $218 \text{ К}$  или  $-55 \text{ }^\circ\text{C}$ , которая пока не получила широкой научной поддержки, ( информация с [www.Superconductors.ORG](http://www.Superconductors.ORG)).

Теоретически нет никаких принципиальных препятствий на пути к открытию комнатно-температурной сверхпроводимости (КТСП) [28].

**Список литературы:** 1. *Слюсар В. И.* // 60 лет теории электрически малых антенн. Некоторые итоги // Электроника: НТБ, 2006. № 7. 2. *Бахрах Л. Д., Бенинсон Л. С.* // Справочник по антенной технике. М. ИПРЖР, 1997. 256с. 3. *Ротхаммель К.* Антенны. Изд.11,Т.1. Изд-во Лайт Лтд. 2005 г. 416с. 4. *Гречихин Л.* Электрически малые антенны: возможности и заблуждения // Радио. 1992. № 11. С. 8–10. 5. *Белоцерковский Г. Б.* Антенны. М.: Оборонгиз, 1956. 6. *IEEE Transactions on Magnetics.* 1989. V.25. P.1313, 1314. 7. *Erzhen Gao, Shapur Sahba, Hui Xu et al.* // IEEE Trans. Appl. Supercond.1998. V. 9. N 2 P. 3066.3069. 8. *Вопилкин Е. А., Парафин А. Е., Павлов С.А. и др.* Высокочастотный перестраиваемый сверхпроводящий контур ВЧ диапазона // Письма в ЖТФ. 2001. Т.27, вып.16. 9. *Мастеров Д.В., Павлов С.А., Парафин А.Е.* Добротность LC-контуров мегагерцового диапазона на основе тонких пленок высокотемпературного сверхпроводника  $Y-Ba-Cu-O$  // Журнал технической физики. 2008.Т. 78, вып.5. 10. *Смиренин Б.Е.* Справочник по радиотехнике. М.: Госэнергоиздат, 1950. 785с. 11. *Дж. Кларк.* Принцип действия и применения Сквидов // ТИИЭР. 1989. Т.77, №8. 118-137с. 12. *Georgy V. Prokopenko, Sergey V. Shitov, Irina L. Lapitskaya, Valery P. Koshelets, and Jesper Mygind* Dynamic Characteristics of S-Band DC SQUID Amplifier // Applied Superconductivity. IEEE Trans, V.13, № 2, 2003, 1042-1045 13. *Alexey S. Kalaboukhov, Michael A. Tarasov, Ants Lohmus, Zdravko G. Ivanov, and Oleg V. Snigirev* Properties of a High-Tc dc SQUID Radiofrequency Amplifier // Applied Superconductivity, IEEE Trans, V.13, № 2, 2003, 1039-1041. 14. *Kornev, V.K.; Soloviev, I.I.; Mukhanov, O. A.* Possible approach to the driver design based on series SQIF // Applied Superconductivity, IEEE Trans V. 15, Issue 2, June 2005 pp 388–391. 15. *V. K. Kornev, I. I. Soloviev, N. V. Klenov, and O. A. Mukhanov* Synthesis of high linearity array structures // Superconducting Science and Technology, vol. 20, pp. S362-S366, 2007. 16. *Victor K. Kornev, Igor I. Soloviev, Nikolai V. Klenov, Timur V. Filippov, Henrik Engseth, and Oleg A. Mukhanov* Performance Advantages and Design Issues of SQIFs for Microwave Applications // IEEE Trans. Appl. Supercond., 2008. 17. *Козырев А.Б.* Эффект быстрого переключения сверхпроводниковых пленок и возможности его использования в СВЧ-микродатчике // Соросовский Образовательный Журнал 2004. Т 8, №1. 18. *Shen Z.* High-Temperature Superconducting Microwave Circuits // Boston. Artech House, 1994 p. 278. 19. *Емельянов В.* Микродатчики СВЧ компоненты на основе высокотемпературных сверхпроводников // Компоненты и технологии. 2001. №7. 20. *Коселец В. П., Шитов С. В., Филиппенко Л. В., Дмитриев П. Н., Ермаков А. Б., Соболев А. С., Торгашин М. Ю.* Интегральные сверхпроводниковые приемники субмм волн // Institute of Radio Engineering and Electronics, Russian Academy of Science. 21. *T. Maya, S. Andersa. V. Zakosarenkoa, M. Starkloff, H.-G. Meyera, G. Thorwirthb E. Kreysac, N. Jethavac* // A Superconducting Terahertz Imager// IEEE/CSC & ESAS European Superconductivity News Forum, No. 1, July 2007. 22. *A. L. Woodcraft* // Dectectors for the 10 000 pixel SCUBA-2 superconducting sub-mm camera for astronomy // in Proceedings of the 2006 31<sup>st</sup> International Conference on Infrared and Millimeter Waves, S. C. Shen,Ed., 2006, p. 496. 23. *Muck M., Welzel C., Clarke J.* // Appl. Phys. Lett. 2003. V. 82. P. 3266{3268. 24. *Paul Bunyk, Konstantin Likharev and Dmitry Zinoviev* // RSFQ Technology: Physics and Devices // *Int. Journal on High Speed Electronics and Systems*, vol. 11, No. 1, pp. 257-306 (2001). 25. // Информационный бюллетень // ПерсТ.Том 7, вып.9. 2000. 26. *Н. А. Черноплеков* Сверхпроводниковые технологии: современное состояние и перспективы практического применения // Вестник Российской Академии Наук. 2001. Т.71, №4 С.303-319. 27. *В. З. Кресин, Ю. Н. Овчинников.* “Гигантское” усиление сверхпроводящего спаривания в металлических нанокластерах, сильное увеличение температуры перехода и возможность сверхпроводимости при комнатной температуре // Успехи Физических Наук. 2008.Т. 178, №5. С. 450-458. 28. *Гинзбург В.Л.* Несколько замечаний об изучении сверхпроводимости // Успехи Физических Наук. 2005. Т. 175, №2. С. 187-190.

Харьковский национальный  
университет радиоэлектроники

Поступила в редакцию 09.01.2009