

ЦИФРОВЫЕ СИСТЕМЫ ПРИЕМА И ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ НА ОСНОВЕ СВЕРХПРОВОДНИКОВОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ

А.Гудков¹, к.ф.-м.н. Gudkov@niifp.ru; Н.Клёнов^{1,2}, И.Соловьёв^{1,2}

Сверхпроводниковая электроника позволяет создавать как высоколинейные аналого-цифровые преобразователи для прямой оцифровки сигнала гигагерцового диапазона, так и сверхбыстродействующие цифровые логические схемы для обработки информации, т.е. открывает дорогу к телекоммуникационным системам и вычислительным комплексам нового поколения. В статье рассмотрены принципы работы основных элементов полностью цифрового сверхпроводникового приемника, содержащего АЦП и сигнальный процессор. Параллельные АЦП и АЦП с избыточной дискретизацией созданы на основе эффекта Джозефсона и эффекта квантования магнитного потока. Благодаря более высокому быстродействию и энергоэффективности джозефсоновских цепей по сравнению с обычными полупроводниковыми схемами новые АЦП и сверхпроводниковые схемы на основе быстрой одноквантовой логики продемонстрировали рекордные возможности приема и обработки высокочастотного сигнала и открыли перспективу создания программно-определяемых телекоммуникационных и радиосистем.

Создание телекоммуникационных систем нового поколения невозможно без решения следующих научно-технологических задач:

- более эффективного использования доступного диапазона частотного спектра;
- расширения этого "доступного диапазона" в сторону более высоких частот;
- увеличения чувствительности всех систем приема сигнала;
- расширения multifunctionality всех систем приема и обработки сигнала в самых разных сферах общественной и экономической жизни – от обеспечения голосовой связи

до радиоэлектронного наблюдения и радиоэлектронной борьбы.

Известные пути решения с использованием традиционной аналоговой электроники имеют ряд недостатков, ограничивающих производительность телекоммуникационных систем в сложной сигнальной и помеховой обстановке. Можно выделить следующие недостатки:

- зависимость от частоты характеристик основных элементов;
- нелинейность используемых преобразований сигнала;
- большие вносимые потери;
- высокие требования к цепям согласования и волноводным соединительным линиям и т.д.

Для радикального решения перечисленных проблем необходимо выйти за пределы области

¹ ЗАО "Компэлст", ФГУП "НИИФП им. Ф.В.Лукина"

² НИИЯФ им. Д.В.Скобельцина, МГУ им. М.В.Ломоносова

традиционных аналоговых радиочастотных устройств. Сверхпроводниковая быстрая одно-квантовая (БОК) электроника позволяет создавать как высоколинейные аналого-цифровые преобразователи для прямой оцифровки сигнала гигагерцового диапазона, так и сверхбыстрые цифровые логические схемы для обработки всей поступившей информации в одном криогенном пакете, открывает дорогу к телекоммуникационным системам нового поколения. Архитектура БОК-электроники, на основе которой уже создан полностью цифровой радиоприемник с объединением функций приема и обработки информации, позволяет перейти к реализации концепции программно-определяемых радиосистем (Software-defined radio, SDR) – радиотелекоммуникационных систем, которые могут быть настроены на произвольную полосу частот в диапазоне от нуля до сотен гигагерц [1, 2].

Существующие сверхпроводниковые полностью цифровые радиоприемники содержат модули оцифровки и обработки сверхвысокочастотного сигнала. Они расположены на одном чипе и функционируют при температуре 4К. Следует отметить, что сегодня уже существуют достаточно миниатюрные и экономичные охлаждающие установки, позволяющие работать при низких ("гелиевых") температурах [3–6].

После первичной обработки и разделения по "каналам" информация в цифровом виде передается обычным вычислительным системам, функционирующим при комнатной температуре, что дает уникальную возможность обрабатывать

при помощи *одной принимающей системы* независимо и одновременно сигналы разной природы, т.е. принадлежащие к разным частотным диапазонам и (или) различающиеся по своей интенсивности на порядки.

В сверхпроводниковых цифровых приемниках удалось отказаться от использования аналоговых цепей, с которыми связаны большой размер, масса, стоимость и высокое энергопотребление телекоммуникационных станций (характеристики этих же аналоговых цепей ограничивали, как правило, и производительность системы в целом). Добиться этого (исключить аналоговые цепи) удалось за счет переноса "точки дискретизации" как можно ближе к апертуре антенны (рис.1). Это стало возможным только благодаря чрезвычайно высокому быстродействию и высокой точности сверхпроводниковых логических цепей и аналого-цифровых преобразователей.

Цель настоящего обзора – описать принципы работы основных элементов полностью цифрового сверхпроводникового приемника и осветить наиболее яркие примеры создания и применения цифровых приемников с использованием сверхпроводниковых технологий.

СВЕРХПРОВОДНИКОВЫЕ АНАЛОГОВО-ЦИФРОВЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

Аналого-цифровой преобразователь (АЦП) – пример электронного устройства "смешанного" типа – преобразует "непрерывный" аналоговый сигнал в "дискретный" цифровой. Как правило, зависящая от времени амплитуда входного сигнала

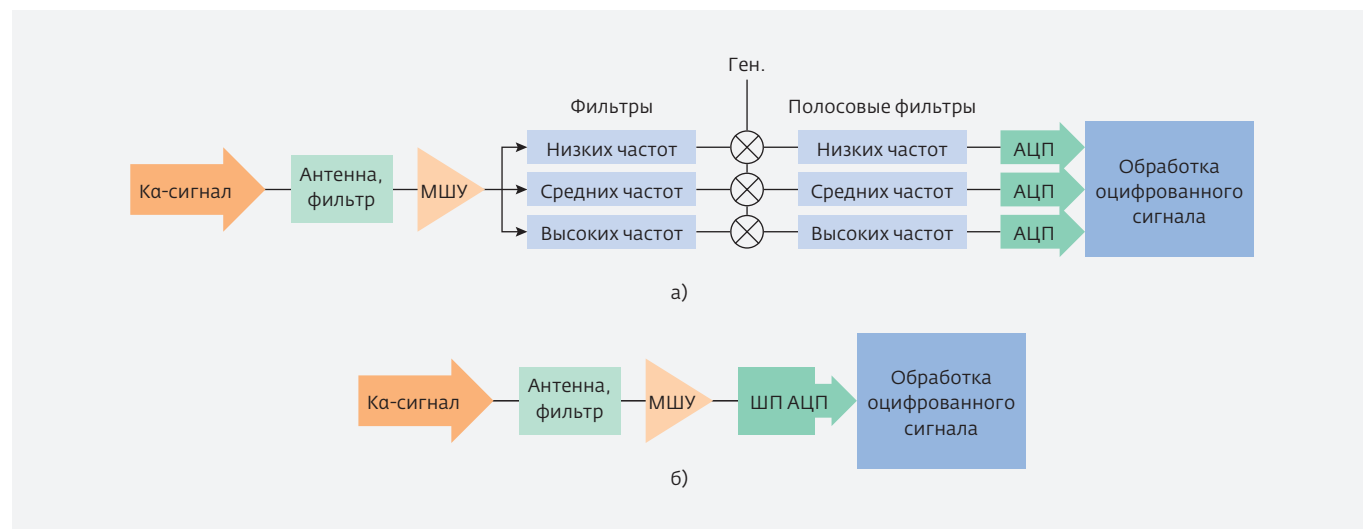


Рис.1. Сравнение принципиальных схем построения приемников: традиционного (а) и полностью цифрового (б), рассчитанного на прием сигнала в широком диапазоне частот

(напряжения) превращается в последовательности N двоичных отсчетов на частоте дискретизации f_c . Высокое быстродействие джозефсоновских цепей по сравнению с обычными полупроводниковыми схемами стало основой для первоначального интереса к сверхпроводниковым технологиям для АЦП-приложений [7, 8].

Первые АЦП на основе криотронов (тонкие пленки сверхпроводника, способные скачком переходить из сверхпроводящего в нормальное состояние под действием приложенного критического магнитного поля) были запатентованы в 1960 году, всего несколько лет спустя после появления первых цифровых устройств на этой технологической базе [9, 10]. Ожидаемое быстродействие на уровне нескольких микросекунд на одну операцию представлялось весьма заманчивым лишь в те далекие времена. Радикально увеличить быстродействие удалось за счет использования джозефсоновских контактов в качестве основных переключающихся элементов. Джозефсоновские контакты – это слабые контакты между сверхпроводящими электродами, способные пропускать бездиссипативный ток вплоть до некоторой величины I_c и переходящие в "резистивное" состояние, если пропускаемый ток превышает указанную критическую величину. Первый джозефсоновский АЦП (с последовательной аппроксимацией сигнала), имеющий практическое значение, был разработан в 1974 году в ИВМ. Это устройство состояло из системы "выборки-и-хранения" (обеспечивает неизменность входного напряжения в течение

времени преобразования) и четырех компараторов на основе последовательно соединенных джозефсоновских элементов, переключающихся в резистивное состояние при некотором заданном уровне сигнала [11, 12].

Важно подчеркнуть, что все первые версии сверхпроводниковых АЦП создавались лишь как более быстрые аналоги обычных полупроводниковых преобразователей. Дальнейшее развитие сверхпроводниковых АЦП получили благодаря уникальным свойствам сверхпроводниковых схем:

- квантовой точности преобразования напряжения в частоту (среднее напряжение на контакте связано с частотой возникающих осцилляций тока и напряжения джозефсоновским соотношением $\bar{V} = (\hbar/2e)\omega$, где \hbar – редуцированная постоянная Планка, e – заряд электрона);
- квантованию магнитного потока в сверхпроводящих контурах;
- чрезвычайно высокой чувствительности сверхпроводящих контуров с джозефсоновскими контактами к изменениям приложенного магнитного потока (высокой эффективности преобразования потока в среднее напряжение $\Phi_e \rightarrow \bar{V}$);
- низкому уровню шумов (при температуре $T=0,9\text{K}$ для датчиков магнитного поля на основе сверхпроводящих контуров с джозефсоновскими контактами рекордное разрешение по энергии $\delta E \approx \hbar$, что лишь в два раза превышает квантовый предел чувствительности);
- высокой энергоэффективности (в джозефсоновском контакте за один период осцилляций напряжения рассеивается менее аДж).

В частности, упомянутое свойство квантования магнитного потока связано с тем, что фундаментальным правилом для сверхпроводящего состояния материала является стремление "вытеснить" за счет формирования экранирующих круговых токов магнитное поле (это возможно для напряженностей магнитного поля, не превышающих определенную критическую величину). В то же время внутри сверхпроводящего контура (в области, свободной от сверхпроводника) магнитный поток может устойчиво существовать, однако его величина будет строго квантована, т.е. кратна минимально возможному магнитному потоку, $\Phi_0 = h/2e \approx 2,07 \cdot 10^{-15}$ Вб, называемому квантом магнитного потока. И если отдельный джозефсоновский контакт можно рассматривать как нелинейный активный элемент (диод), то простейший сверхпроводящий контур с двумя контактами (СКВИД (сверхпроводящий

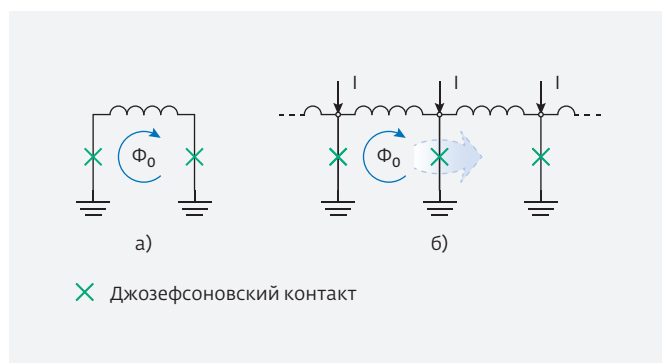


Рис.2. Сверхпроводящий контур с двумя джозефсоновскими контактами (а); джозефсоновская передающая линия (б). Квант магнитного потока передается между контурами за счет силы Лоренца, создаваемой приложенным током I . Суммарный магнитный поток в контуре кратен кванту потока Φ_0 . Круговой стрелкой показан циркулирующий ток, соответствующий магнитному потоку, находящемуся в контуре

квантовый интерференционный датчик) постоянного тока, или ПТ СКВИД) будет выступать аналогом транзистора – нелинейным элементом с магнитным управлением [13–15].

Бит информации в логических устройствах на основе таких "транзисторов" – это наличие/отсутствие одного кванта магнитного потока в сверхпроводящем контуре, содержащем джозефсоновские контакты. Соединяя несколько джозефсоновских контактов параллельно (рис.2), можно создать джозефсоновскую передающую линию, по которой будет передаваться бит информации за счет силы Лоренца. Сверхпроводники дают уникальную возможность передавать пикосекундные волновые пакеты без искажения со скоростью, близкой к скорости света (в отличие от полупроводниковых элементов здесь нет RC-задержек "на перезарядку"). Важно подчеркнуть, что описанное движение квантов магнитного потока возможно, только если величина вынуждающей силы, создаваемой током питания I , превышает некоторое пороговое значение (величина которого задается потенциальным барьером Пайерлса-Набарро). Этот факт и позволяет построить простейший сверхпроводниковый "квантователь": джозефсоновский компаратор, схема работы которого представлена на рис.3. В контур компаратора через джозефсоновскую передающую линию "Вход" попадают (при правильно подобранных токах питания I и I_{COMP}) кванты магнитного потока. В зависимости от соотношения между величиной сигнала (I_{signal}) и критическим током контактов (I_c) упомянутые кванты, проходя через выделенную рамкой "пару принятия решения", появляются (или не появляются) в джозефсоновской линии "Выход" [16–17].

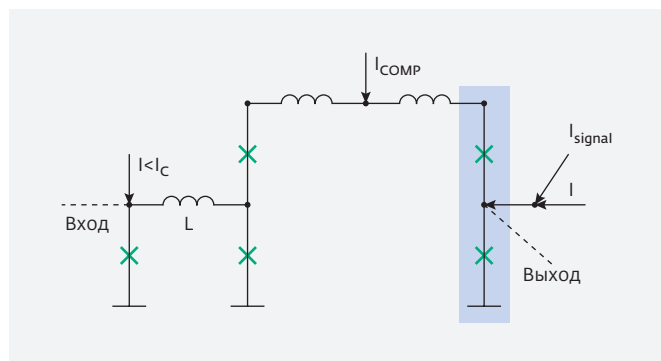


Рис.3. Принципиальная схема балансного джозефсоновского компаратора. Обозначения: I и I_{COMP} – токи питания, I_{signal} – ток аналогового сигнала, I_c – критический ток контактов. Рамкой выделена "пара принятия решения"

В России впервые схема джозефсоновского регенеративного импульсного триода в качестве высокочувствительного компаратора (на основе торцевых джозефсоновских переходов с непосредственной проводимостью), содержащая также джозефсоновский генератор квантов и передающую линию, была реализована совместно НИИФП им. Ф.В.Лукина и МГУ им.М.В.Ломоносова [18].

Естественно, реально функционирующие сегодня устройства заметно сложнее. Среди принципиально новых сверхпроводниковых АЦП можно выделить два типа устройств. Первый тип – параллельные АЦП с большим количеством компараторов-квантователей, у которых частота дискретизации в идеальном случае вдвое превышает частоту Найквиста, и второй – дельта и дельта-сигма АЦП с одним компаратором, которые работают с частотой дискретизации, во много раз превышающей требуемую, и путем фильтрации оставляют в сигнале только нужную спектральную полосу (в традиционных названиях корни "дельта" (Δ) и "сигма" (Σ) призваны обозначать, соответственно, разность и сумму, т.е. "цифровые" аналоги суммирования и интегрирования). Первый тип устройств хорошо подходит для оцифровки широкополосных сигналов со средними требованиями к разрешению (до 8 бит). Второй тип АЦП благодаря возможности создания практически идеального интегратора в цепи обратной связи позволяет оцифровать узкополосный сигнал с высоким разрешением.

Сверхпроводниковые параллельные АЦП. В 1975 году в ИВМ были созданы первые параллельные "найквистовские" АЦП, достаточно полно использующие уникальные свойства

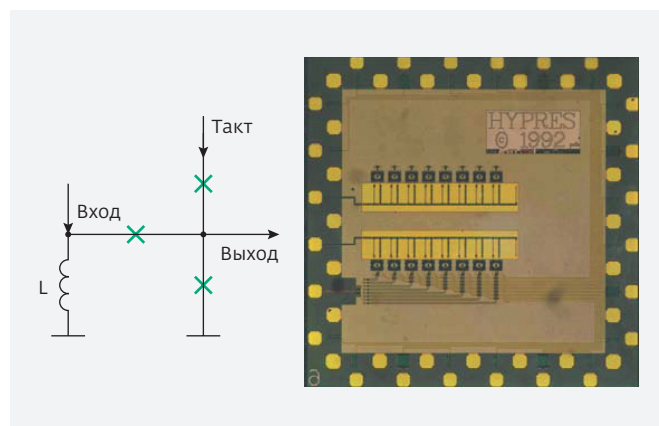


Рис.4. Принципиальная схема квазиодноконтантного компаратора и фотография компактного флеш-АЦП на основе такой архитектуры [27]

сверхпроводниковых систем: Φ_0 -периодичная вольт-потокосвая зависимость двухконтактного ПТ СКВИДа дает возможность создать n -битный флеш-АЦП, используя всего n компараторов, тогда как для обычных полупроводниковых технологий здесь требуется $(2^n - 1)$ однопороговых компараторов [19].

Использование асимметричных ПТ СКВИДов в качестве компараторов позволяет, как видим, существенно упростить все схемы. А высочайшая чувствительность СКВИДов позволяет оцифровать даже очень слабые аналоговые сигналы [20-23]. Особо стоит отметить, что увеличение линейности вольт-потокосвого преобразования в ПТ СКВИДе (например, за счет нелинейного джозефсоновского шунтирования геометрической индуктивности [24]) может привести к существенному улучшению характеристик устройства в целом.

В борьбе за увеличение компактности сверхпроводниковых АЦП прорывными внедрениями стали:

- переход к использованию квазиодноконтактных сверхпроводящих контуров в качестве основной элементной базы [25, 26]. На рис.4 показано, как одноконтактный интерферометр с Φ_0 -периодичной зависимостью тока через контакт от тока, поданного на вход, связан с парой джозефсоновского компаратора [27];
- совершенствование цепей, связывающих "холодную" часть системы с электроникой, работающей при комнатной температуре.

В итоге в 2010 году тестовые исследования, проведенные в ISTECS (Япония), продемонстрировали успешное функционирование основных элементов АЦП при быстрейшем действии

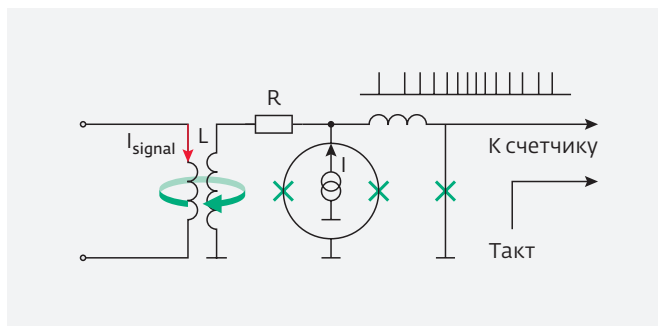


Рис.5. Принципиальная схема функционирования АЦП на $V \rightarrow f$ преобразовании (в качестве преобразующего элемента используется ПТ СКВИД, рабочую точку которого определяет ток питания I и аналоговый сигнал I_{signal})

до 15 Гбит/с [28, 29]. Однако до сих пор успешному практическому использованию параллельных АЦП (увеличению количества "эффективных битов" устройства) мешает необходимость одновременно прикладывать аналоговый сигнал и тактирующие импульсы ко всем используемым компараторам.

Сверхпроводниковые АЦП с избыточной дискретизацией. Простейшим базовым элементом такого АЦП (использующего, как уже упоминалось, только один компаратор) может выступать даже джозефсоновский контакт (с подключенным параллельно сопротивлением). На этом элементе приложенное напряжение (возникшее под действием токового входного сигнала) преобразуется в пакеты БОК-импульсов с характерной частотой $f = 2eV/h = V/\Phi_0$. Количество БОК-импульсов, пришедших от джозефсоновского контакта (или от ПТ СКВИДа, заменяющего контакт (рис.5) для большей чувствительности преобразования $V \rightarrow f$) на счетчик за определенный "тактовый" интервал, и определяет полученную "оцифрованную" величину сигнала. Предельная продемонстрированная частота переключений в такой системе может достигать 100 ГГц [30].

Более совершенная структура основного элемента АЦП была разработана в МГУ им. М.В.Ломоносова и ИРЭ РАН в начале 1990-х годов [31]. В этой структуре джозефсоновский переход заменен на ПТ СКВИД, с индуктивностью которого непосредственно

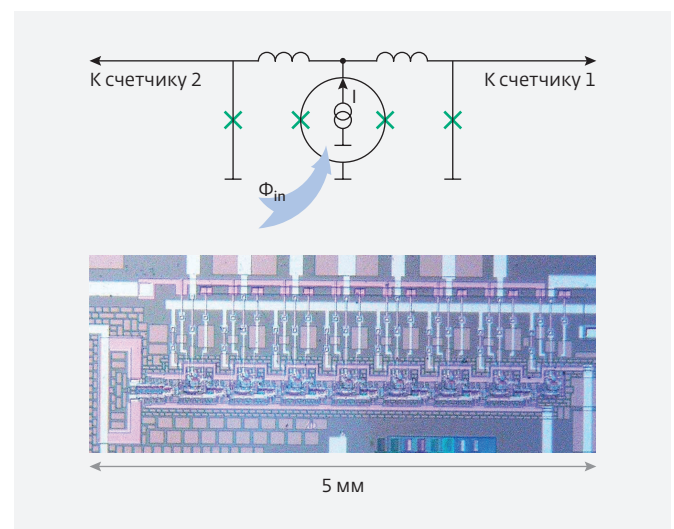


Рис.6. Фотография первой АЦП с двумя счетчиками БОК-импульсов (аналоговый сигнал Φ_{in} "входит" непосредственно в геометрическую индуктивность ПТ СКВИДа) и иллюстрация принципа работы основного элемента

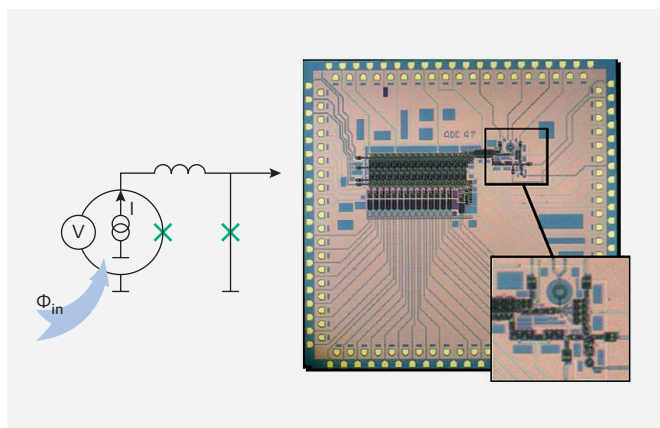


Рис.7. Принципиальная схема базовой ячейки АЦП с фазовой модуляцией-демодуляцией и фотография чипа с АЦП (компания HYPRES, 2000 г.)

связан входной сигнал. Он генерирует БОК-импульсы (идушие, как показано на рис.6, либо к счетчику 1, либо к счетчику 2) всякий раз, когда поток через его сверхпроводящий контур увеличивается/уменьшается на Φ_0 .

Недостаток этой архитектуры – характерный для "квантователя" на основе СКВИДа гистерезис при смене знака производной потока по времени. Решить эту проблему удалось в АЦП с фазовой модуляцией-демодуляцией, принципиальная схема базового элемента которой представлена на рис.7. В этой ячейке источник напряжения (или фазы) с постоянной скоростью "закачивает" в сверхпроводящий контур с одним джозефсоновским

переходом магнитный поток. При этом скорость, с которой кванты магнитного потока покидают контур в виде БОК-импульсов, определяет аналоговый входной сигнал. Экспериментально продемонстрированный АЦП на основе такого подхода имел 14,5 бит эфф. и быстродействие до 46×10^9 тактов/с [32].

Такие успехи позволяют уверенно создавать эффективные полностью цифровые приемники для космической связи вплоть до X-диапазона (7,5-8,5 ГГц) и рассчитывать на создание программно управляемых систем связи нового поколения с тактовой частотой до 20 ГГц и более.

ОБРАБОТКА ОЦИФРОВАННОГО СИГНАЛА И ПОСТРОЕНИЕ ПОЛНОСТЬЮ ЦИФРОВОГО ПРИЕМНИКА

Сверхпроводниковая часть полностью цифрового приемника должна содержать специализированный процессор для обработки сигналов. Такой процессор, предусматривающий возможность разделения поступающего цифрового сигнала по отдельным каналам, уже был разработан и успешно интегрирован на один чип с АЦП [33].

Принцип работы основных элементов сверхпроводникового процессора (рис.8) также основан на эффекте макроскопической квантовой интерференции. БОК-импульсы используются в таких схемах как "тактовые импульсы", т.е. делят время работы на такты. Квант магнитного потока, появившийся на входе или на выходе

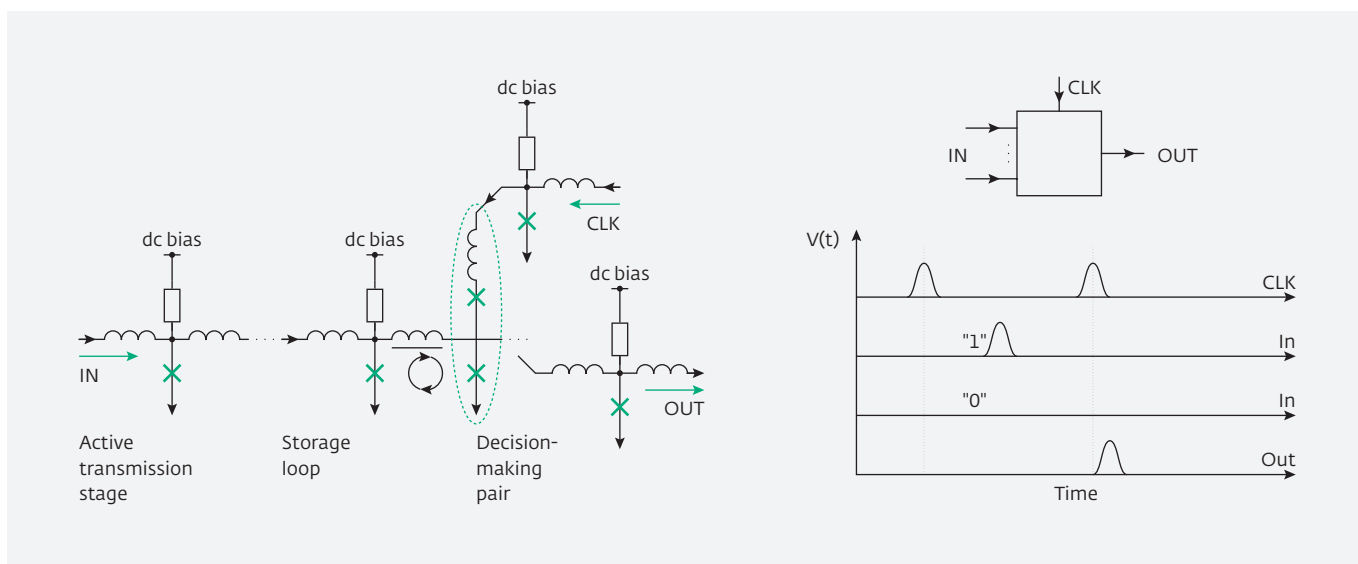


Рис.8. Принципиальная схема сверхпроводникового логического элемента "Тождество" ("Повторитель", D-элемент) и иллюстрация принципа его работы

схемы в течение такта, рассматривается как логическая "1", а отсутствие кванта – как логический "0". Одноквантовый импульс, появляющийся на выходе схемы в начале следующего такта, является логической функцией от БОК-импульсов, действовавших на входах схемы в предыдущем такте. Максимальная экспериментально продемонстрированная тактовая частота работы логических БОК-элементов, изготовленных по стандартной ниобиевой технологии с базой 0,25 мкм, достигает 750 ГГц. Успешно продемонстрировано функционирование арифметически-логических устройств (процессоров) [34, 35]. Перечисленные результаты позволяют эффективно использовать построенные на основе БОК-логики сигнальные процессоры в полностью цифровых приемниках для первичной обработки пришедшего широкополосного сигнала с последующей передачей его в удобной форме в вычислительные комплексы телекоммуникационной системы, работающие при комнатной температуре.

Отдельно надо отметить, что сверхпроводниковые вычислители сами по себе представляют значительный интерес для систем приема и обработки информации: характерное выделение энергии при "обработке" одного БОК-импульса составляет $\sim 3/4 \Phi_0 I_c \sim 0,2 \times 10^{-18}$ Дж. Как следствие, энергопотребление упомянутых выше процессоров, работающих с тактовыми частотами, составляющими десятки гигагерц, составляет менее 10 мВ. В условиях, когда вычислительные и коммуникационные комплексы потребляют около 5% мировой электроэнергии (причем эта доля возрастет до 10% в ближайшие пять лет), переход на предельно энергоэффективную джозефсоновскую технологию обещает огромный экономический эффект [36, 37].

В результате созданные на сегодняшний день энергоэффективные цифровые приемники, включающие как криогенные, так и "комнатнотемпературные" части (и соответственно, как сверхпроводниковые, так и полупроводниковые компоненты), продемонстрировали способность:

- принимать аналоговые сигналы самых разных частот: от единиц килогерц до гигагерцевого X-диапазона;
- превращать поток данных (с тактовой частотой, достигающей до 40 ГГц) в пакеты отдельных БОК-импульсов;
- разделять этот поток данных по отдельным каналам для последующей обработки,

уменьшая за счет серии преобразований вниз несущую частоту;

- усиливать токовые импульсы до величин, подходящих для устройств полупроводниковой электроники за счет интегрированных интерфейсов [1].

Можно заключить, что использование уникальных свойств сверхпроводниковой электроники позволило сделать важный шаг к созданию полностью цифровых приемников, а затем и программно-определяемых (принимающих и передающих) телекоммуникационных систем, свободно "переключающихся" между диапазонами частот по команде персонального компьютера [38, 39].

Работы проводились при поддержке Минобрнауки РФ, Фонда "Династия", Гранта Президента МК-1841.2014.2 и грантов РФФИ 14-02-31002-мол-а, 14-02-90018-бел-а.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Mukhanov O.A. et al.** Superconductor Digital-RF Receiver Systems. – *Ice trans. electron.*, 2008, v.E91-C, №3, p.306–317.
2. **Mukhanov O.A., Gupta D., Kadin A., Semenov V.K.** Superconductor analog-to-digital converters. – *Proc. IEEE*, 2004, v.92, p.1564–1584.
3. **Gan Z.H., Dong W.Q., Qiu L.M. et al.** – *Cryogenics*, 2009, v.49, p.198.
4. **Xu M.Y., de Waele A.T.A.M., Ju Y.L.** – *Cryogenics*, 1999, v.39, p.865.
5. **Wang C., Thummes G., Heiden C.** – *Adv. Cryo. Eng.*, 1998, v.43, p.2055.
6. <http://www.stirlingcryogenics.com/products/Cryocoolers/>
7. **Lee G.S., Petersen D.A.** Superconductor A/D converters. – *Proc. IEEE*, 1989, Aug, v.77, p.1264–1273.
8. **Mukhanov O.A., Gupta D., Kadin A., Semenov V.K.** Superconductor Analog-to-Digital Converters. – *Proc. of the IEEE*, 2004, Oct., v.92, p.1564–1584.
9. **Buck D.A.** – *Proc. IRE*, 1956, v. 44, 482, 558.
10. U.S. Patent 3 196 427, July 20, 1965 (Filed Nov. 14, 1960). Superconductive analog-to-digital converter. / Mann H.T., Fladlien D.G.
11. U.S. Patent 3 949 395, Apr. 6, 1976 (Filed Aug. 28, 1974). Successive-approximation analog-to-digital converter using Josephson devices. / Klein M.
12. **Klein M.** Analog to digital converter using Josephson junctions. – *ISSCC77, Digest of Tech. Papers*, 1977, p.202–203.
13. **Шмидт В.В.** Введение в физику сверхпроводимости. – М.: МЦНМО, 2000.

14. **Лихарев К.К.** Введение в динамику джозефсоновских переходов. – М.: Наука, 1985.
15. **Ван Дuzер Т., Тернер Ч.У.** Физические основы сверхпроводниковых устройств и цепей. – М.: Радио и связь, 1984.
16. **Likharev K.K., Semenov V.K.** RSFQ logic/memory family: A new Josephson junction technology for sub-terahertz-clock-frequency digital systems. – IEEE Trans. on Appl. Supercond., 1993, v.1, p.3-28.
17. **Lin J.-C., Semenov V.K., Likharev K.K.** Design of an RSFQ-counting analog-to-digital converter. – IEEE Trans. on Appl. Supercond., 1995, v.5, p.2252-2259.
18. **Гудков А.Л., Корнев В.Н., Махов В.И., Мушков С.И., Семенов В.К., Щедрин В.Д.** Джозефсоновский регенеративный импульсный триод как высокочувствительный компаратор. – Письма в ЖТФ, 1988, т.14, вып.12, с.1127-1131.
19. **Zappe H.H.** An analog-to-digital converter using Josephson junctions. – IBM Tech. Discl. Bull., 1975, v.17, №10, p.3053.
20. **Harris R.E., Hamilton C.A., Lloyd F.L.** Multiple-quantum interference superconducting analog-to-digital converter. – Appl. Phys. Lett., v.35, p.720-721.
21. U.S. Patent 4315 255, Feb. 9, 1982 (Filed Oct. 27, 1980), Nov. 1979. Multiple-quantum interference superconducting analog-to-digital converter. / Harris R.E., Hamilton C.A.
22. **Hamilton C.A., Lloyd F.L.** Design limitations of superconducting A/D converters. – IEEE Trans. Magn., 1981, v.MAG-17, p.3414-3419.
23. **Ohara S., Imamura T., Hasuo S.** 5 GHz Josephson A/D convertor. – Electron. Lett., 1988, v.24, №14, p.850-851, July.
24. **Kornev V.K., Soloviev I.I., Klenov N.V., Mukhanov O.A.** Bi-SQUID – Novel Linearization Method for dc SQUID Voltage Response. – Superconductor Science and Technology, 2009, v.22, p.114011.
25. **Ko H., Van Duzer T.** A new high-speed periodic-threshold comparator for use in a Josephson A/D converter. – IEEE J. Solid-State Cir., 1988, Aug., v.23, №4, p.1017-1021.
26. **Bradley P., Dang H.** Design and testing of quasioverlapped junction SQUID-based comparators at low and high speed for superconductor flash A/D converters. – IEEE Trans. Appl. Superconduct., 1991, Sept., v.1, p.134-139.
27. **Bradley P.** A 6-bit Josephson flash A/D converter with GHz input bandwidth. – IEEE Trans. Appl. Supercond., 1993, Mar., v.3, №1, p.2550-2557.
28. **Maruyama M., Suzuki H., Hashimoto Y., Hidaka M.** A flash A/D converter using complimentary combined SQUIDs. – IEEE Trans. Appl. Supercond., 2009, Jun., v.19, №3, p.680-684.
29. **Suzuki H., Oikawa M., Nishii K., Ishihara K., Fujiwara K., Maruyama M., Hidaka M.** Design and demonstration of a 5-bit flash-type SFQ integrated with error correction and interleaving circuits. – IEEE Trans. Appl. Supercond., 2011, Jun., v.21, №3.
30. **Hamilton C.A., Lloyd F.L.** 100 GHz binary counter based on dc SQUIDs. – IEEE Electron. Dev. Lett., 1982, Nov., v.3, p.335-338.
31. **Fillipenko L.V., Kaplunenko V.K., Khabipov M.I., Koshelets V.P., Likharev K.K., Mukhanov O.A., Rylov S.V., Semenov V.K., Vystavkin A.N.** Experimental implementation of analog-to-digital converter based on the reversible ripple counter. – IEEE Trans. Magn., 1991, Mar., v. MAG-27, №2, p.2464-2467.
32. **Inamdar A., Rylov S., Sahu A., Sarwana S., Gupta D.** Quarter-rate superconducting modulator for improved high resolution analog-to-digital converter. – IEEE Trans. Applied Superconductivity, 2007, Jun., v.17, №2, p.446-450.
33. **Gupta D., Filippov T.V., Kirichenko A.F., Kirichenko D.E., Vernik I.V., Sahu A., Sarwana S., Shevchenko P., Talalaevskii A., Mukhanov O.A.** Digital channelizing radio frequency receiver. – IEEE Trans. Appl. Supercond., 2007, June, v.17, №2, p.430-437.
34. **Fujimaki A., Tanaka M., Yamada T., Yamanashi Y., Park H., Yoshikawa N.** Bit-Serial Single Flux Quantum Microprocessor CORE. – IEICE Trans. Electron., 2008, Mar., v.E91-C p.342-349.
35. **Filippov T., Dorojevets M., Sahu A. et al.** – IEEE Trans. on Appl. Supercond., 2011, v.21, №3, p.847.
36. **Nishijima S., Eckroad S., Marian A. et al.** – Supercond. Sci. Technol., 2013, 26, p.113001.
37. **Mukhanov O.A.** Energy-Efficient Single Flux Quantum Technology. – IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2011, v.21, №3, p.760.
38. **Wikborg E.B., Semenov V.K., Likharev K.K.** RSFQ front-end for a software radio receiver. – IEEE Trans. Appl. Supercond., 1999, June, v.9, №2, p.3615-3618.
39. **Fujimaki A., Katayama M., Hayakawa H., Ogawa A.** Advanced base-station based on superconductive devices and software-defined radio technology. – Supercond. Sci. Technol., 1999, v.12, p.708-710.