

25-ЛЕТНИЙ ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ ЦИФРОВЫХ ТЕХНОЛОГИИ ОБРАБОТКИ РАДИОСИГНАЛОВ В НИИ ЦИФРОВЫХ СИСТЕМ ЮУрГУ

Ю.Т. Карманов

В период 1963-1975 гг. в Челябинском политехническом институте (ныне ЮУрГУ) под руководством доктора технических наук, профессора, ректора института Виталия Васильевича Мельникова при активном участии заведующего кафедрой РТС к.т.н., доцента В.А. Лосева, заведующего кафедрой КИПР к.т.н., доцента В.П. Серегина, начальника научно-исследовательской лаборатории (НИЛ) «Электрон» В.П. Быстрова сформировался научный коллектив молодых ученых и радиоинженеров,

Основу научного коллектива составили молодые ученые и инженеры В.А. Макровец, В.Ф. Ненахов, Ю.П. Щербак, Н.Л. Телякова, В.Н. Степаненко, В.К. Баранов, В.М. Коровин, В.В. Милованов, Ю.Т. Карманов, М.И. Шуняев, В.М. Рукавишников, А.А. Корняков, В.В. Родионов, Б.В. Пермяков, В.Н. Мельников и др. Научное руководство осуществлял В.В. Мельников, оперативное руководство В.А. Лосев, В.П. Серегин, материально-техническую и оформительскую поддержку работ осуществлял В.П. Быстрое с супругой Г.М. Быстровой.

1. История применения цифровых технологий обработки радиосигналов в ВНИИ цифровых систем ЮУрГУ

Научный коллектив вел интенсивные исследования в области разработки перспективных средств радиотехнической разведки (РТР), радиоэлектронного подавления (РЭП), радиолокации и радионавигации. Велись разработки образцов радиоаппаратуры, проводились натурные испытания на полигонах заказчика, подготавливались и защищались диссертации.

В 1976-1978 гг. одним из направлений исследований в НИЛ «Электрон» становится разработка цифровых технологий обработки радиосигналов для средств РЭП и РТР. Появился заказчик - Научно-исследовательский институт автоматических систем (НИИ АС) Министерства авиационной промышленности в лице молодого доктора технических наук начальника НИЛ О.Е. Антонова, что способствовало развитию данного направления исследований. Для проведения работ в области цифровых технологий обработки радиосигналов была сформирована группа ученых и инженеров в составе Ю.Т. Карманова, М.И. Шуняева, В.М. Рукавишникова, В.А. Хабина, В.Н. Мельникова, которая с большим энтузиазмом начала работать по новой тематике.

Проблема, которую предстояло решить коллективу на этом этапе, заключается в следующем. Типовая организация радиоэлектронного подавле-

ния радиоэлектронных средств (РЭС) состоит из нескольких этапов:

- на первом этапе средство РТР осуществляет прием радиосигналов подавляемой РЭС и осуществляет измерение их несущей частоты, длительности, периода повторения импульсов и т.п.;
- на втором этапе в средстве РЭП управляемый генератор высокочастотных радиосигналов настраивается на измеренную несущую частоту радиосигналов подавляемой РЭС;
- на третьем этапе радиосигнал управляемого генератора средства РЭП модулируется по амплитуде, частоте и фазе помеховыми колебаниями, усиливается передатчиком помех и излучается в направлении подавляемой РЭС.

Так как подавляемые РЭС работают на сверхвысоких частотах (десятки тысяч мегагерц), имеют малую длительность радиоимпульсов (доли микросекунд), то в процессе измерения их несущих частот и наведения управляемого генератора на измеренную частоту возникают большие ошибки (до нескольких десятков мегагерц). Для их компенсации средства РЭП вынуждено резко (в разы) расширять ширину спектра излучаемых помех. Из-за этого только очень малая доля энергии излучаемых помех (несколько процентов) проникает в приемник РЭС и создает помехи средству РЭС.

Вследствие этого эффективность таких средств РЭП не высока, что и поставило на повестку дня задачу поиска путей ее повышения.

Наш коллектив, проанализировав с помощью заказчиков состояние вопроса, предложил для решения проблемы повышения эффективности средств РЭП другую организацию радиоэлектронного подавления РЭС. Было предложено вместо измерения несущей частоты, длительности и т.д. радиосигналов подавляемой РЭС осуществлять запоминание («фотографирование») временной структуры радиосигналов РЭС и на этой основе по специальным алгоритмам формировать помеховое колебание. При реализации такого подхода практически исключаются ошибки наведения помехи по частоте и ширине спектра, так как помеховое колебание формируется из самих радиосигналов и это гарантирует совпадение их частот и ширины спектров.

Вместе с тем реализация такого подхода была сопряжена с большими техническими трудностями из-за невозможности с помощью аналоговой техники запоминать сверхвысокочастотные радиосигнала (десятки тысяч мегагерц) на необходимое время

(несколько десятков микросекунд) с необходимой точностью. Реализовать такой подход можно было только с помощью цифровой техники. Но для этого требовалась цифровая техника с тактовыми частотами в несколько сотен мегагерц, с объемами ОЗУ в сотни килобайт. В 1975–1980 гг. такой техники в СССР не было. Вместе с тем к 1980 г. благодаря умелому сочетанию существующей аналоговой техники с появляющейся цифровой техникой коллективом разработчиков НИЛ «Электрон» были созданы цифровые устройства запоминания и воспроизведения СВЧ-радиосигналов способные запоминать СВЧ-радиосигналы длительностью до 10 мкс в полосе до 50 МГц (рис. 1). Это был большой успех коллектива, так как наличие таких цифровых устройств запоминания и воспроизведения СВЧ-радиосигналов позволяло создать эффективные средства РЭП принципиально нового «цифрового» типа.

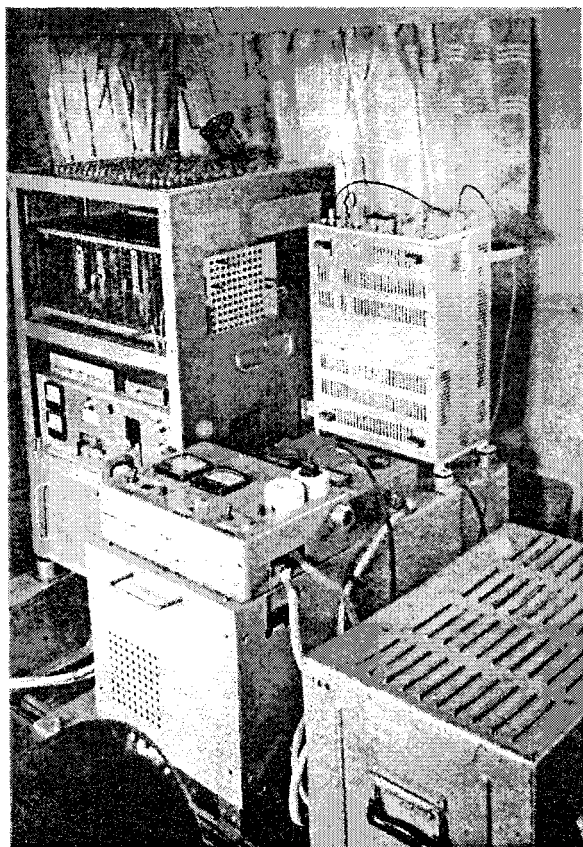


Рис. 1. Первый макет, 1981 г.

В восьмидесятые годы наш коллектив был первым и единственным в СССР коллективом, которому удалось создать цифровые устройства запоминания и воспроизведения радиосигналов, что подтверждено приоритетами соответствующих заявок на изобретения. В США такие устройства появились на один год ранее. Большая заслуга в создании цифровых устройств запоминания и воспроизведения радиосигналов принадлежит ученым и инженерам М.И. Шуняеву, В.М. Рукавишникову, В.А. Хабину, В.Н. Мельникову. Особенно хочется

отметить ведущую роль в создании таких устройств Михаила Ивановича Шуняева, инженера «от бога». Без его идей, филигранного умения создавать уникальные радиоэлектронные схемы, сочетающие аналоговую и цифровую технику, было бы невозможно достичь успеха при состоянии цифровой техники в СССР 1975–1980 гг.

Для демонстрации возможностей новой идеологии построения РТС на базе цифровой обработки радиосигналов группой был разработан и изготовлен ряд действующих макетов. Успешная демонстрация их работы привлекла внимание потенциальных заказчиков от ВВС и Минавиапрома.

К 1981 г., благодаря поддержке Командования ВВС, руководства НИИ АС и личного участия начальника управления ВВС генерал-майора Н.Ф. Николенко, полковника Е.М. Яковлева, начальника лаборатории НИИ АС д.т.н., профессора О.Е. Антонова, группа разработала и изготовила летные макеты цифровых РТС, установила их на летающей лаборатории на базе самолета ТУ-134Ш и в период с 1982 г. по 1983 г. провела успешные летные испытания на полигонах ВВС.

В организации летных испытаний большое содействие было оказано со стороны командования авиацией Уральского военного округа, начальника и офицеров Челябинского высшего военного авиационного училища штурманов при активном участии заведующего кафедрой училища д.т.н., профессора В.И. Ширяева, полковника М.И. Хаютина и др.

Успешные летные испытания макетов произвели большое впечатление на заказчиков и научно-исследовательские организации Минрадиопрома, занимающиеся разработкой аналогичных средств.

Поэтому Генштаб при поддержке ВВС и ВМФ, Минавиапрома, Минрадиопрома и Минвуза СССР обратился к руководству страны с предложением о создании в ЧПИ на базе НИЛ «Электрон» проблемной НИЛ «Протон» и поручении ей выполнения трех ОКР по созданию цифровых РТС нового поколения на основе полученных и успешно продемонстрированных результатов. Благодаря личному участию ректора ЧГТУ д.т.н., профессора Г.П. Вяткина, заместителя министра высшего образования, академика РАН И.М. Макарова, начальника управления Генштаба генерал-майора М.Г. Воронина, начальника управления ВВС генерал-майора Н.Ф. Николенко, полковника Е.М. Яковлева, полковника В.Н. Субботина, заведующего отделом Минвуза А.А. Малюка, инспектора Е.И. Лапина это предложение руководством страны было принято.

С этого момента начался новый этап развития коллектива лаборатории. Под руководством научного руководителя ПНИЛ «Протон» Ю.Т. Карманова (рис. 2) в сжатые сроки была проведена переориентация коллектива с выполнения вузовских НИР на задачи опытно-конструкторской разработки образцов цифровых РТС. Это потребо-

вало, наряду с созданием конструкторских подразделений, освоения ведущими научными работниками и инженерами приемов и технологии проведения ОКР., изучения ГОСТов, ОСТов, нормалей, инструкций и других нормативных документов. Решение этих задач позволило коллективу ПНИЛ «Протон» в 1985-1986 гг. успешно завершить технические проекты трех порученных ОКР и успешно испытать созданные макеты. Два из них испытывались на самолетах ТУ-134Ш и АН-12, а третий на борту СКР «Бдительный» Балтийского флота, где до сих пор успешно работает.

Успех разработок и испытаний в большой степени был обусловлен широкой поддержкой коллектива со стороны представительств заказчиков ВВС и ВМФ и ведущих организаций Минрадиопрома: НИИ автоматических приборов (г. Новосибирск), НИИ по измерительной технике (г. Челябинск), НИИ «Экран» (г. Самара), Таганрогского НИИ связи. Офицеры представительств заказчика и сотрудники предприятий оказали коллективу ПНИЛ «Протон» большое содействие в приобретении навыков ведения полномасштабных ОКР. Среди них главный конструктор В.П. Державин, заместитель главного конструктора Ю.Н. Квитко, полковники Ю.Н. Широков, Е.В. Озеров, А.А. Кузнецов.

Однако, первый этап ОКР показал, что материальная и испытательная база ПНИЛ явно недостаточна для успешного проведения всего цикла работ от идеи до передачи аппаратуры в серийное производство. В связи с этим в 1986 г. руководство Минобороны, Минвуза, Минавиапрома и Минрадиопрома СССР для ускорения внедрения новой идеологии построения цифровых РЭС обратились к руководству страны с предложением создать на базе ПНИЛ «Протон» ЧПИ научно-исследовательский институт с выделением ему финансовых и материальных ресурсов для развития научной, испытательной и производственной базы. Благодаря личной поддержке со стороны заместителя министра обороны генерала армии В.М. Шабанова, ректора ЧГТУ Г.П. Вяткина, начальника управления Минрадиопрома А.Н. Шулунова, заведующего отделом Минвуза В.П. Попко, инспектора Е.И. Лапина это предложение было поддержано, и 16 июня 1987 г. распоряжением Совмина СССР было предписано создать на базе ПНИЛ «Протон» ЧПИ Научно-исследовательский институт цифровых систем (НИИЦС) при Челябинском политехническом институте. Директором института был назначен к.т.н., доцент Ю.Т. Карманов.

В течение трех лет коллектив НИИЦС сумел использовать предоставленные решением Правительства возможности, и к 1990 г. институт сформировался как полномасштабное научно-исследовательское учреждение с развитой материальной, испытательной, научной и конструкторской базой, способное вести научно-исследовательские и опытно-

но-конструкторские работы в области радиоэлектроники от идеи до внедрения.

В 1989 г. был введен в эксплуатацию новый отдельный корпус НИИЦС площадью 5000 м², оснащенный современными средствами измерений, вычислительной техникой, автоматизированными рабочими местами конструкторов и разработчиков, станками и другой техникой. Одновременно в институте были созданы новые научно-исследовательские, конструкторские и испытательные подразделения, укомплектованные высококвалифицированными кадрами - в основном выпускниками радиотехнических кафедр приборостроительного факультета ЧГТУ. Для оперативного проведения летных испытаний разрабатываемой аппаратуры решением Минвуза и Минобороны был открыт Челябинский межведомственный научно-испытательный центр на базе НИИЦС, Челябинского ВВАУШ, авиационного полигона «Сафакулево» УрВО, 4-й армии ПВО, в рамках которого была создана испытательная база института. В нее вошли три летающие лаборатории на базе самолета ТУ-134Ш и вертолета МИ-8МТ, радиополигон на базе авиационного полигона «Сафакулево», научно-испытательная лаборатория на территории Челябинского ВВАУШ.



Рис. 2. Директор института, к.т.н., доцент Ю.Т. Карманов

В результате коллектив института в сжатые сроки успешно завершил опытно-конструкторские работы с изготовлением образцов цифровых РЭС, проведением государственных наземных и летных испытаний и в 1991 г. совместно с НИИ «Экран» внедрил цифровую РЭС в серийное производство. В этом большая заслуга сотрудников института и особенно заместителей директора В.С. Спицына, В.М. Рукавишникова, М.И. Шуняева (рис. 3), начальников отделов и НИЛ В.А. Хабина, В.И. Рыжова, В.А. Миронова, В.К. Баранова.

В настоящее время НИИЦС является научно-исследовательским подразделением ЮУрГУ, ведущим научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы по созданию цифровых радиотехнических систем и устройств. Сейчас коллектив института насчитывает около 70 со-

трудников, в том числе один доктор технических наук, 4 кандидата технических наук, 10 научных сотрудников, 25 инженеров. К выполнению работ привлекаются преподаватели и сотрудники кафедры «Цифровые радиотехнические системы».

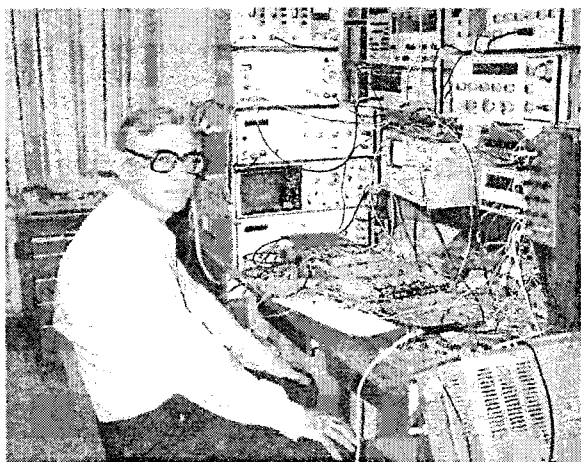


Рис. 3. Главный конструктор ОКР «Метеор-DM2-4» к.т.н. М.И. Шуняев

В свою очередь ведущие сотрудники НИИЦС (рис. 4) читают лекции, ведут учебные занятия со студентами кафедры «Цифровые радиотехнические системы». Студенты привлекаются к выполнению НИОКР в НИИЦС, что создает хорошие условия для подготовки кадрового резерва.



Рис. 4. Сотрудники НИИЦС

Сегодня цифровые технологии обработки радиосигналов бурно развиваются во всем мире и широко используются не только в радиотехнических системах специального назначения, но и в радиоаппаратуре широкого применения (сотовая связь, телевидение, видео- и аудиосистемы и т.п.).

За прошедшие годы цифровая техника достигла громадных успехов, разработаны и сегодня широко применяются многоразрядные (до 32) сигнальные процессоры, программируемые логические интегральные схемы (ПЛИС), микроконтроллеры, АЦП, ЦАП с тактовой частотой до 600 МГц, объемами ОЗУ в несколько мегабит. На их базе созданы цифровые устройства запоминания и воспроизведения радиосигналов, позволяющие запо-

минать СВЧ-радиосигналы в полосе до 500 МГц, с временем запоминания в несколько сотен миллисекунд. Устройства выполнены в виде специализированных чипов. Разработанная в восьмидесятых годах коллективом НИИЦС цифровая технология обработки радиосигналов повсеместно используется разработчиками РТС, как надежный инструмент повышения их эффективности.

2. Проблемы и перспективы применения цифровых технологий обработки радиосигналов в разработках средств РТР, РЭП, РЛС, РНС и радиосвязи

Несмотря на большие успехи по развитию и применению цифровых технологий обработки радиосигналов существует ряд проблем их использования при разработке РТС.

В частности есть такие проблемы и при разработке современных и перспективных устройств запоминания и воспроизведения радиосигналов (ЦУЗВР). В настоящем разделе анализируются некоторые из них и обсуждаются пути их решения.

За 25 лет технические возможности цифровых устройств запоминания и воспроизведения радиосигналов (ЦУЗВР) резко расширились. Первые ЦУЗВР имели рабочую полосу в несколько мегагерц, могли запоминать радиосигналы длительностью в несколько микросекунд, имели значительную массу и габариты. К настоящему времени промышленностью освоено производство специализированных БИС, позволяющих запоминать и воспроизводить радиосигналы в полосе частот в несколько сотен мегагерц, с длительностями в десятки миллисекунд.

Цифровое запоминание и воспроизведение радиосигнала позволяет получить его подробный цифровой портрет, запомнить его и многократно воспроизводить, наделяя при необходимости дополнительными модуляциями [1, 4, 6, 13, 16, 17].

Вместе с тем опыт применения ЦУЗВР выявил ряд проблем, которые сдерживают развитие техники цифрового запоминания и воспроизведения радиосигналов.

2.1. Проблемы запоминания и воспроизведения узкополосных радиосигналов при изменениях их несущей частоты и амплитуды в широких диапазонах

Как правило, несущая частота запоминаемых радиосигналов априорно неизвестна, известен лишь диапазон частот [13]. Поэтому за прошедшие 25 лет с момента появления ЦУЗВР основные усилия разработчиков были направлены на увеличение рабочего диапазона частот ЦУЗВР [13, 17, 18].

Рабочий диапазон частот ЦУЗВР определяется частотой дискретизации радиосигнала по времени [10, 13]. Эта зависимость описывается выражением

$$\Delta F_p \leq F_q, \quad (1)$$

где ΔF_p – рабочий диапазон ЦУЗВ; F_q – частота дискретизации запоминаемого радиосигнала по времени.

В связи с этим единственным способом расширения рабочего диапазона частот ЦУЗВР является увеличение частоты дискретизации радиосигналов по времени. На сегодняшний день развитие микроэлектроники позволило реализовать ЦУЗВР с частотой дискретизации $F_q = 600$ МГц, на подходе устройства, реализующие $F_q = 3000$ МГц [13, 18].

Для подавляющего числа практических приложений диапазон несущих частот запоминаемых радиосигналов $\Delta F_p \leq F_q = 600\text{--}3000$ МГц более чем достаточен [14].

Вместе с тем качество запоминания и воспроизведения радиосигналов в ЦУЗВР, характеризуемое уровнем паразитных составляющих в спектре воспроизводимого ЦУЗВР радиосигнала, определяется числом и распределением уровней квантования мгновенных значений радиосигнала в процессе преобразования его в цифровые слова и обратного восстановления из цифровых слов радиосигнала [13, 17].

Мощность запоминаемых радиосигналов также априорно неизвестна и изменяется в динамическом диапазоне порядка 60–70 дБ [4, 7, 13].

В этих условиях возникает проблема преобразования запоминаемых радиосигналов в цифровые слова и их последующего запоминания, обратного преобразования и воспроизведения радиосигналов.

Действительно, согласно [10, 12] при фиксированной амплитуде запоминаемого радиосигнала для достижения уровня паразитных составляющих в спектре воспроизводимого радиосигнала не более минус 30 дБ необходимо преобразовать мгновенное значение его квадратур в два слова длиной не менее 4 разряда каждое. Общая длина запоминаемого в ЦУЗВР цифрового слова должна быть не менее 8 разрядов, а объем ЗУ ЦУЗВР должен составлять не менее $8\Delta F_p \tau_c$ бит, где τ_c – длительность радиосигнала.

Если амплитуда запоминаемого радиосигнала изменяется в диапазоне 60 дБ (10^3 раз), то для достижения одинаковой дискретности квантования квадратур при любой амплитуде радиосигнала необходимо увеличить длину запоминаемого слова до 18–20 разрядов, а объем ЗУ ЦУЗВР должен составлять $(18\text{--}20)\Delta F_p \tau_c$ бит.

Реализация АЦП, ЦАП, ЗУ в ЦУЗВР в этом случае является сложной задачей, требующей значительного увеличения габаритов, энергопотребления и соблюдения жестких требований к стабильности характеристик ЦУЗВР.

Предложено и разработано несколько способов решения этой проблемы [4, 10, 12, 16, 17, 18].

Первый способ заключается в сжатии динамического диапазона запоминаемых радиосигна-

лов, путем предварительного ограничения (жесткого или мягкого) амплитуды запоминаемого радиосигнала с соответствующей коррекцией амплитуды, воспроизведенного радиосигнала.

Таким способом, можно достичь значительно сокращения длины цифровых слов и требуемого объема ЗУ ЦУЗВР, при запоминании и воспроизведении одиночного узкополосного радиосигнала.

Действительно, применяя мягкое ограничение запоминаемого радиосигнала с помощью усилителя с логарифмической характеристикой, можно сжать динамический диапазон радиосигнала приблизительно в 100 раз и соответственно уменьшить длину цифрового слова до 12 разрядов.

При этом мягкое ограничение радиосигнала породит дополнительные паразитные составляющие спектра воспроизводимого радиосигнала на гармониках несущей частоты. Однако, при одиночном радиосигнале они как правило не попадают в диапазон рабочих частот ЦУЗВР и их устранение обычно не вызывает трудностей.

Жесткое ограничение позволяет уменьшить длину цифровых слов до 8–10 разрядов.

Серьезные трудности возникают при широких диапазонах изменения несущих частот радиосигналов -100–250 МГц, когда в рабочую полосу ЦУЗВР попадает сразу несколько радиосигналов на разных частотах. В этом случае ограничение радиосигналов порождает дополнительные паразитные составляющие в спектре воспроизводимого сигнала, уровни которых могут быть значительными. К сожалению, исследование уровней паразитных составляющих для этого случая, по видимому, не проводилось.

Кроме этого из-за ограничения суммы радиосигналов, амплитуда каждого из которых априорно известна, трудно в воспроизводимых радиосигналах управлять соотношением их амплитуд.

Во втором способе сжатие динамического диапазона достигается применением автоматической регулировки усиления на входе ЦУЗВР (АРУ, БАРУ, МАРУ).

Для одиночных радиосигналов таким способом можно добиться существенного сокращения длины цифровых слов и объема ЗУ, так как за длительность пачки одиночных радиосигналов их амплитуда меняется слабо. При запоминании суммы нескольких радиосигналов на разных частотах, что характерно при широком рабочем частотном диапазоне ЦУЗВР, возникают быстрые изменения амплитуды суммарного радиосигнала порядка 60–70 дБ из-за биений радиосигналов. В этом случае АРУ не может отследить эти изменения и достичь уменьшения длины цифровых слов в ЦУЗВР не удастся.

Третий способ основан на раздельном преобразовании амплитуды и текущей фазы узкополосных запоминаемых радиосигналов относительно опорного колебания [13].

Так как амплитуда даже суммы нескольких радиосигналов меняется много медленнее, чем текущая фаза, обусловлена биениями радиосигнала с опорным колебанием, то дискретизировать их по времени можно с разными тактовыми частотами, что приведет к уменьшению объема ЗУ ЦУЗВР. Кроме того, число уровней квантования по амплитуде можно сделать меньше, чем по текущей фазе [13, 17], что даст дополнительное уменьшение объема ЗУ ЦУЗВР.

Данный способ потенциально может дать уменьшение объема ЗУ ЦУЗВР, как при одиночных радиосигналах, так и при запоминании суммы радиосигналов при широкой рабочей полосе частот ЦУЗВР.

Однако его потенциальные возможности при запоминании суммы радиосигналов плохо исследованы.

2.2. Проблемы запоминания и воспроизведения широкополосных радиосигналов при изменениях несущей частоты и амплитуды в широких диапазонах

В практике применения ЦУЗВР встречаются радиосигналы, ширина полосы спектра частот которых сопоставима с рабочей полосой частот ЦУЗВР.

В отличие от рассматриваемых ранее узкополосных радиосигналов, запоминание и воспроизведение широкополосных радиосигналов имеет свои особенности.

Во-первых, при запоминании широкополосных радиосигналов их несущая частота не известна и меняется в широком диапазоне $-\Delta F_n$. Поэтому рабочая полоса частот ЦУЗВР должна быть увеличена на ширину спектра частот ΔF_c радиосигнала и составит $\Delta F_p = \Delta F_c + \Delta F_n$.

В противном случае будут искажения спектра запоминаемого радиосигнала при приближении значения несущей частоты радиосигнала к границам диапазона ΔF_n . При узкополосных радиосигналах $\Delta F_c \ll \Delta F_n$ и $\Delta F_p \approx \Delta F_n$.

Вследствие этого в ЦУЗВР должна применяться повышенная частота дискретизации $F_q \geq \Delta F_n + \Delta F_c$, что ведет к увеличению объема ЗУ ЦУЗВР. Такое увеличение может быть очень большим для радиосигналов занимающих большую полосу частот и состоящих из набора синхронных узкополосных радиосигналов на разных несущих частотах. Например, при $\Delta F_c = \Delta F_n$ объем ЗУ увеличивается в 2 раза.

Во-вторых, мгновенная мощность радиосигнала неизвестна и может изменяться в широком динамическом диапазоне. Применение ограничения запоминаемого радиосигнала в этом случае может привести к искажениям спектра. Поэтому потребуется значительно увеличить длину запоминаемых цифровых слов.

В-третьих, зависимость уровней паразитной и основной составляющих спектра воспроизведенного радиосигнала от числа и расположения уровней квантования в АЦП и ЦАП будет носить более сложный характер, чем в случае узкополосных радиосигналов, что также потребует увеличения длины цифровых слов. Исследования для этого случая не проводились.

Рассмотренные особенности запоминания и воспроизведения широкополосных радиосигналов могут создать серьезные трудности при реализации ЦУЗВР. Эти трудности обусловлены необходимостью использования больших частот дискретизации (≥ 1000 МГц) оперативных ЗУ большого объема.

В целом проблема запоминания широкополосных радиосигналов плохо изучена и ждет своих исследователей. Особенно это касается проблемы запоминания и воспроизведения радиосигналов не синусоидальной формы, в виде последовательности сверхкоротких видеоимпульсов $\tau_u \approx 10^{-10}$ с [15].

2.3. Проблема многократного и частого воспроизведения радиосигналов

Типовая технология воспроизведения запоминаемого радиосигнала заключается [10, 13]:

- в считывании из ЗУ цифровых слов, соответствующих временным отсчетам запомненного радиосигнала;
- в преобразовании их в соответствии с заданными законами амплитудной и фазовой модуляции;
- в получении аналоговых сигналов в виде квадратур воспроизводимого радиосигнала путем цифроаналогового преобразования цифровых слов;
- в получении воспроизводимого радиосигнала путем квадратурной модуляции колебания опорного генератора.

Первая проблема, возникающая при многократном воспроизведении радиосигнала, обусловлена необходимостью хранить запомненную копию в течение некоторого времени и многократно воспроизводить из нее радиосигнал.

Типовая технология запоминания и воспроизведения радиосигналов предполагает их демодуляцию относительно колебания опорного генератора при преобразовании в цифровые слова и последующую модуляцию колебания опорного генератора при их воспроизведении.

Но для реальных опорных генераторов характерны не контролируемые изменения их частоты и паразитная фазовая модуляция генерируемых колебаний.

Вследствие этого воспроизведение радиосигнала происходит относительно колебания опорного генератора, несущая частота и частотная структура которого отличаются от несущей частоты и структуры колебания, используемого при запоминании радиосигнала. Это отличие тем больше, чем

больше время, прошедшее между запоминанием и воспроизведением радиосигнала.

Из-за этого структура воспроизводимого радиосигнала, отличается от структуры запоминаемого радиосигнала и это отличие тем больше, чем больше время между запоминанием и воспроизведением радиосигнала.

Данная проблема плохо изучена. В литературе рассмотрен лишь случай паразитной частотной модуляции колебания опорного генератора пульсациями источника питания.

Показано, что в этом случае допустимое время между запоминанием и воспроизведением радиосигнала ограничено и не должно превышать 25 % периода пульсаций источника питания.

Решение данной проблемы лежит на пути улучшения характеристик опорных генераторов.

Вторая проблема связана с необходимостью введения в цифровой виде в воспроизводимый радиосигнал дополнительных модуляций по частоте, фазе и амплитуде [4, 13, 15]. В частности необходимо изменять несущую частоту воспроизводимого радиосигнала относительно несущей частоты запоминаемого радиосигнала [13, 16].

Дополнительные модуляции приводят к уменьшению уровня полезной составляющей и увеличению уровня паразитных составляющих в спектре воспроизводимого радиосигнала [10, 16]. Это вызывает необходимость поиска способов нейтрализации такого эффекта.

Проблема достаточно полно изучена для случая сдвига несущей частоты воспроизводимого непрерывного и квазинепрерывного радиосигнала на несколько десятков килогерц относительно несущей частоты запоминаемого радиосигнала [10, 13, 16]. Показано, что в этом случае уровень полезной составляющей в спектре воспроизводимого радиосигнала уменьшается в два раза в децибелах [10]. При этом появляются дополнительные паразитные составляющие в спектре радиосигнала, положение и уровни которых зависят от величины сдвига частоты, от числа и расположения уровней квантования значений радиосигнала и от частоты дискретизации по времени [10].

Для этого случая предложен и исследован способ частичной нейтрализации этого эффекта путем введения в процесс преобразования радиосигнала в цифровую форму случайных факторов в виде добавления к цифровой копии радиосигнала и цифровой копии законов модуляции случайных возмущений [10, 13]. Показано, что в некоторых случаях это приводит к уменьшению уровня паразитных составляющих в спектре воспроизводимого радиосигнала на 20-30 дБ [10].

Вместе с тем возможность распространения данных результатов на случай широкополосных радиосигналов, на сумму нескольких радиосигналов, на случай сдвига несущей на большие величины не очевидна.

Требуется проведение дальнейших исследований.

Третья проблема связана с практической необходимостью частого многократного воспроизведения ЦУЗВР радиосигналов.

Она возникает в случае, когда временной интервал между отдельными воспроизводимыми радиосигналами меньше чем их длительность τ_c .

В этом случае необходимо организовывать ЦУЗВР так, чтобы существовала возможность одновременного считывания из ОЗУ нескольких цифровых копий, параллельного ввода в них дополнительных модуляций и воспроизведения каждого из них. Обычно требуемый интервал между воспроизводимыми радиосигналами колеблется от 0,1 мкс до 10 мкс.

Поэтому при малых длительностях радиосигналов порядка нескольких микросекунд общее число одновременно воспроизводимых радиосигналов не велико и это не вызывает серьезных трудностей при разработке ЦУЗВР.

Однако при запоминании и воспроизведении длинно-импульсных радиосигналов с внутрисигнальной модуляцией (ЛЧМ, ФКМ-сигналы), длительность которых составляет несколько сотен микросекунд [7], необходимо одновременно воспроизводить несколько сотен радиосигналов. Это создает большие проблемы при реализации ЦУЗВР, так как даже на современной технологической базе они имеют громадные размеры и большое энергопотребление.

Предложений по кардинальному решению данной проблемы за прошедшие 25 лет не появилось.

Для запоминания и воспроизведения длинно-импульсных радиосигналов, для обработки которых применяются сжимающие фильтры, можно не полностью их воспроизводить, искусственно укорачивая их длительность. Это приведет к уменьшению требуемого количества одновременно воспроизводимых радиосигналов в ЦУЗВР.

Однако при этом структура воспроизводимого радиосигнала исказится, что проявится в форме сжатого сигнала и уровне его боковых лепестков.

Исследования показали, что допустимо укорачивать воспроизводимый радиосигнал до 50 % [4, 13]. Это позволяет в два раза уменьшить число одновременно воспроизводимых в ЦУЗВР радиосигналов.

Литература

- 1. Lowenschuss, O. Когерентная ВЧ память - новое средство для обработки сигналов. / O. Lowenschuss // IEEENACON-80. Proc, Dayton. - P. 1188-1194 (пер. № 81/42813, фонд ГПНТБ).*
- 2. Пат. 4280219 США, Gordon Digital Memory System / O. Lowenschuss, E. Bruce E. - № 4280219, опублик. 21.07.1981.*

3. Лари, У. Разработка нового авиационного оборудования / У. Лари // *Электроника*. - 1986. - № 10. - С. 34.
4. Карманов, Ю. Т. Исследование параметров цифровых устройств запоминания и воспроизведения радиосигналов / Ю. Т. Карманов, В. М. Рукавишников, М. И. Шуняев // *Сборник научных трудов ЧПИ*. - 1980. - С. 70-76.
5. Карманов, Ю.Т. Цифровая обработка радиолокационных сигналов на фоне активных помех / Ю. Т. Карманов, В. В. Родионов I/ *Тезисы доклада НТК молодых ученых уральской зоны, Свердловск*, 1974.-С. 15-17.
6. А. с. 187159 СССР. Цифровой формирователь многократных ответных радиосигналов / Ю. Т. Карманов, М. И. Шуняев, В. М. Рукавишников, В. А. Хабин, заявлено 5.11.80.
7. Ван Брант, Л. Б. Справочник по методам радиоэлектронного подавления и помехозащиты с радиолокационным управлением / Л. Б. Ван Брант, под ред. К. И. Фомичева, П. М. Юдина. - 1985.
8. Афинов, В. Состояние и перспективы развития средств РЭБ армии США / В. Афинов // *Зарубежное военное обозрение*. - 1989 -№6.-С. 20.
9. Ильзамег, Е. Необходимость создания новых систем электронной войны / Е. Ильзамег (пер. № П-7344, фонд НИИЭР).
10. Родионов, В. В. Спектры радиосигналов на выходе устройств квантования и дискретизации / В. В. Родионов, А. В. Сомов. - Челябинск: ЧГТУ, 1994.
11. Баранов, Л. А. Квантование по уровню и временная дискретизация в цифровых системах управления I Л. А. Баранов. - М.: Энергоатомиздат, 1990.
12. Рукавишников, В. М. О квантовании и дискретизации фазы сигнала в присутствии помех / В. М. Рукавишников, В. И. Рыжов // *Теория и техника радиосистем*. - Челябинск: ЧПИ- С. 52-26.
13. Карманов, Ю. Т. Цифровые способы запоминания и воспроизведения радиосигналов / Ю. Т. Карманов, В. М. Рукавишников // *Цифровые радиотехнические системы*. - 1997. - № 1. - Режим доступа: <http://www.drts.susu.ac.ru>, свободный.
14. Взгляды США на развитие ВВС в начале XXI века // *Зарубежное военное обозрение*. - 1998. - Вып. 1.
15. Имореев, В. А. Сверхширокополосные радары: новые возможности, научные проблемы, системные особенности / В. А. Имореев // *Вестник МРТУ*. -1998.
16. Рукавишников, В. М. Цифровой серродинный преобразователь частоты / В. М. Рукавишников, В. Н. Мельников // *Теория и техника радиосистем: Сб. научных трудов ЧПИ № 273*. - Челябинск: ЧПИ, 1982. - С. 33-36.
17. Шуняев, М. И. Цифровые методы запоминания и воспроизведения радиосигналов / М. И. Шуняев, В. М. Рукавишников, В. Н. Мельников // *Теория и техника радиосистем: Сб. научных трудов ЧПИ, № 273*. - Челябинск: ЧПИ. - 1982. - С. 39-44.
18. Техническое описание микросхемы 1879ВМЗ (DSM), Версия 1.1. ЮФКВ 431268001 Т01К. - М.: Научно-технический центр «Модуль».