

Первый в мире адаптивный цифровой компенсатор пассивных помех

Владимир Бартнев (bartvg@rambler.ru)

Статья приурочена к столетию АО «ВНИИРТ» и дню рождения Павла Михайловича Чудакова, под руководством которого был создан цифровой компенсатор пассивных помех.

В этом году в августе две юбилейные даты: 100 лет со дня создания Остехбюро (ныне АО Всероссийский НИИ Радиотехники, «ВНИИРТ») и 100 лет со дня рождения директора «ВНИИРТ» Павла Михайловича Чудакова. У оборонного предприятия АО «ВНИИРТ» богатая история. Трудно перечислить все научно-технические достижения (многие из которых были созданы впервые в мире) этого награждённого орденом Трудового Красного Знамени НИИ [1]. Но об одном из достижений, которое непосредственно связано со временем, когда во главе «ВНИИРТ» стоял Павел Михайлович Чудаков, автор статьи хотел бы рассказать.

51 год назад по Постановлению ЦК КПСС и СМ СССР от 8 июня 1970 г. № 417-146. Всесоюзный НИИ радиотехники (ныне АО «ВНИИРТ») приступил к разработке передвижной трёхкоординатной радиолокационной станции обнаружения и сопровождения мало-высотных воздушных целей в условиях воздействия активных и пассивных помех, СТ-68 (см. рис. 1). И вот в этой РЛС впервые в мире был приме-



Рис. 1. РЛС СТ-68 (ВНИИРТ)

нён адаптивный цифровой компенсатор пассивных помех.

Несколько слов необходимо сказать об этой уникальной РЛС СТ-68 [1]. В ней было предложено много новых технических решений, в частности реализовано сочетание принципов активной и пассивной радиолокации. Работа многоканальной многофункциональной радиолокационной станции СТ-68 осуществлялась в двух существенно разных диапазонах волн. Использование двух активных и двух пассивных каналов обеспечивало обнаружение целей по всей зоне обзора, пеленгацию поставщиков активных помех. Для селекции целей на фоне комбинированных помех использовалось сочетание антенны с электронным сканированием в двух плоскостях и когерентного накопления эхо-сигналов с режекцией отражений от различных пассивных помех. Для борьбы с помехами также использовалась круговая поляризация, аппаратура компенсации шумовых помех, бланкирование импульсных сигналов, приходящих по боковым лепесткам, схемы ШОУ, БАРУ и др. Высокая когерентность излучаемых сигналов и цифровая обработка принимаемых сигналов обеспечивали подавление отражений от местных предметов до 50–60 дБ, что очень важно для мало-высотных РЛС. Имелся в РЛС СТ-68 и вспомогательный канал, где использовался квазинепрерывный сигнал, что позволило значительно улучшить характеристики обнаружения в зоне обзора ниже 1° по углу места. С помощью электронного сканирования в двух плоскостях (по азимуту +30°, углу места от 0° до 6°) в РЛС с использованием системы управления зоной обнаружения можно было «замедлять» обзор в требуемых секторах, особенно в секторах с наличием различных помех. Перечисленные

характеристики РЛС СТ-68 говорят о высоких технических требованиях, предъявленных заказчиком к этой станции, которые были выполнены.

Однако при проведении испытательного образца наблюдалось наличие значительного количества так называемых «ангелов» [3] в зоне обнаружения станции. Отражения от «ангелов», или, как ещё их называют «отражения от ясного неба», наблюдались наиболее интенсивно в районах 50–100 км от РЛС, их уровень превышал полезный сигнал до 30 дБ, а скорость перемещения достигала 100–120 км/ч. Система вторичной обработки станции перегружалась целеподобными отметками, нарушалась нормальная работа РЛС, ухудшались точностные характеристики.

Чтобы преодолеть указанные трудности, был предпринят целый ряд мероприятий. Главный конструктор РЛС С.П. Рабинович был отстранён от разработки, и работу возглавил лично директор «ВНИИРТ» Павел Михайлович Чудаков (см. рис. 2). Чудаков создал в институте специализированное подразделение по цифровой обработке сигналов. Автор этих строк тогда только влился в коллектив «ВНИИРТ» после распределения и окончания очной аспирантуры и защиты кандидатской диссертации. Мне было поручено оценить, как влияет число усредняемых выборок при оценке скорости пассивной помехи на её подавление в адаптивном цифровом компенсаторе. Такая задача мной была выполнена. При этом для решения этой задачи аналитически впервые было использовано распределение Уишарта [4]. Полученные результаты работы были внедрены в РЛС СТ-68 для обнаружения мало-высотных целей на фоне дискретных мешающих отражений. На заключительном этапе разработки РЛС СТ-68 П. М. Чудаков сделал всё возможное для успешного окончания государственных испытаний и принятия станции на вооружение. Автоматическая адаптация режимов РЛС к окружающей обстановке с применением селекции движущихся целей (СДЦ)

в виде адаптивного цифрового компенсатора (АЦК) позволила успешно решить возникшую проблему. Испытания были завершены многоцелевой «массовкой» с применением активных и пассивных помех повышенной интенсивности. Станция вела себя отлично. Результаты превзошли все ожидания.

Прежде чем подробно рассмотреть устройство адаптивного цифрового компенсатора, следует вспомнить о состоянии цифровой обработки когерентных сигналов в начале 70-х годов в СССР и за рубежом. По мере того как магнетроны в передатчиках РЛС заменялись мощными усилителями (на клистродах ЛБВ, амплитронах), что позволяло получить истинную когерентность излучаемых радиоимпульсов, а на смену ртутным линиям задержки и потенциалоскопам пришли кварцевые ультразвуковые линии задержки, работающие на промежуточной частоте, эффективность систем СДЦ существенно повышалась. Однако линии задержки требовали термостатирования и всевозможных автоматических регулировок. Поэтому проблема стабильной работы аналоговых когерентных систем оставалась главной. И хотя более совершенная элементная база с появлением транзисторов и первых интегральных микросхем серьёзным образом повлияла на построение когерентных систем обработки радиолокационных сигналов, самым узким местом к концу 60-х годов оставалось быстродействующее аналого-цифровое преобразование. Может быть, поэтому первым отечественным цифровым устройством с когерентной обработкой радиосигналов была не система СДЦ, а когерентный многоканальный доплеровский накопитель на 32 импульса. Автору этой статьи довелось участвовать в разработке этого устройства, когда он работал в Новосибирском Научно-исследовательском институте измерительных приборов. Что же способствовало созданию цифрового когерентного накопителя, который был использован в РЛС 9С18 (главный конструктор А.П. Ветошко) для защиты от мощных шумовых заградительных помех? К концу 60-х гг. в СССР появились первые цифровые микросхемы сдвиговых регистров 186-й серии. Например, 186ИР4 – 64-разрядный квазистатический последовательный регистр сдвига. Именно на них и

были реализованы цифровые линии задержки когерентного накопителя. Для стабилизации ложных тревог на входе накопителя было применено жёсткое ограничение сигналов на промежуточной частоте с последующим выделением с помощью фазовых детекторов квадратурных составляющих, которые с помощью компараторов квантовали фазу на четыре уровня. С отводов регистров сдвига сигналы подавались на резистивную матрицу, формирующую весовые коэффициенты дискретного преобразования Фурье. Сигналы с 32 доплеровских каналов объединялись на выходе схемой максимального отбора и после сравнения с порогом подвергались дополнительно некогерентному накоплению. Испытания этого накопителя в 1974–1975 гг. показали хорошие результаты, и самое главное – выявили преимущество цифровой обработки. Создать подобное устройство на аналоговых линиях задержки не представлялось возможным. Попытки применить жёсткое ограничение на входе системы СДЦ, как в когерентном накопителе для упрощения цифровой их реализации, показали отрицательный результат. Настоящей сенсацией в то время можно назвать статью в Westinghouse Electric Corporation, где было приведено описание практической реализации первой в мире цифровой системы СДЦ [5]. Как отмечали авторы этой статьи, аналого-цифровой преобразователь являлся наиболее сложным устройством в этой цифровой системе СДЦ. Это и понятно, 9-разрядный АЦП с частотой преобразования 10 МГц в конце 60-х гг. изготовить было непросто. В качестве цифровой памяти использовалась память на ферритовых кольцах. Для ускорения работ по созданию цифровой системы СДЦ в НИИИП было поручено подготовить техническое задание и взаимодействовать с Институтом электротехники СОАН СССР, где по договору с НИИИП разрабатывался восьмиразрядный высокоскоростной АЦП с частотой дискретизации 3 МГц. Эти работы велись в лаборатории А.Н. Касперовича. Такой АЦП был создан, более того, он был внедрён на Новосибирском заводе им. Коминтерна в РЛС 1С12 в рамках проводившейся в то время модернизации. Однако более преуспел в области цифровой когерентной обработки сигналов «ВНИИРТ».



Рис. 2. П.М. Чудаков (1921–1985)

Как уже было отмечено, приступив в 1970 году к разработке мобильной трёхкоординатной РЛС СТ-68, институт не только создал цифровую систему СДЦ, но и сделал её адаптивной в виде цифрового адаптивного компенсатора пассивных помех.

Рассмотрим устройство и работу АЦК (блок 59ФК12). Фактически это СДЦ в виде цифрового двухкратного череспериодного компенсатора, в котором первая ступень – просто череспериодный вычитатель, а вторая ступень – вычитатель с адаптивно подстраиваемыми на основе оценки доплеровской скорости пассивной помехи весовыми коэффициентами.

На вход АЦК поступают следующие сигналы:

- параллельные двоичные 10-разрядные коды по двум квадратурам;
- сигналы синхронизации;
- трёхразрядные коды управления режимами работы.

С выхода блока снимаются выходные сигналы:

- параллельный двоичный код – 110-разрядные;
- импульсный сигнал НРД (начало рабочей дистанции);
- импульсный сигнал КРД (конец рабочей дистанции).

Принцип работы АЦК сводится к однократному череспериодному вычитанию входных кодов отдельно по каждой квадратуре без сдвига нуля частотной характеристики, после которого производится дополнительное череспериодное вычитание совместно по обеим квадратурам, используя оценку межпериодной разности фазы для сдвига положения нуля

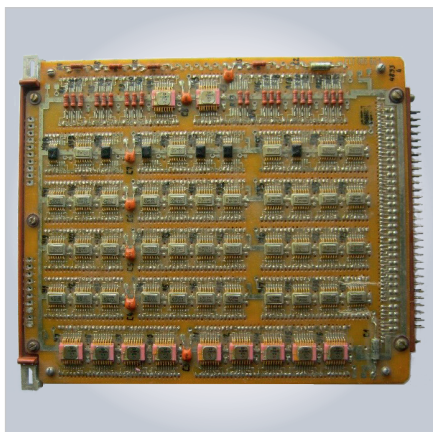


Рис. 3. Типовая ячейка АЦК В2ПР4



Рис. 4. Первый в мире адаптивный цифровой компенсатор пассивных помех

частотной характеристики АЦК. Величина сдвига нуля частотной характеристики второго вычитателя либо равна нулю по всем элементам дистанции (режим ЧПК-0), либо автоматически адаптируется (режим АЦК). На выходе блока для получения кода амплитуды производится объединение модулей квадратур.

Режимы работы АЦК, коды режимов и граничные значения оценки межпериодной разности фазы приведены в таблице.

В режиме ЧПК-Т вычитание кодов не производится, выполняется только транзит сигналов и объединение квадратур. Режим АЦК имеет две модификации. В режиме АЦК-1 оценка положения нуля скоростной характеристики производится без усреднения по элементам дистанции. Это режим защиты от целеподобных сигналов «ангелов».

Режимы работы АЦК

Режим работы	ЧПК-Т	ЧПК-0	АЦК-1					АЦК-2
			000	001	010	011	100	
Код	110	111	000	001	010	011	100	101
(град)	–	0	22,5	33,75	45	67,5	90	без огр.

В режиме АЦК-2 оценка положения нуля скоростной характеристики производится путём усреднения по четырём элементам дистанции. Это режим защиты от перемещающихся протяжённых пассивных помех. Для оценки межпериодной разности фазы использован алгоритм максимального правдоподобия, реализованный в масштабе реального времени. АЦК выполнен на типовом шасси полного объёма. Вес – 13,5 кг.

На лицевой панели расположены: сигнальные лампочки, контрольные гнезда, микротумблеры режимов. Все применяемые в АЦК ячейки соединяются при помощи розеток и направляющих, установленных на шасси блока.

В АЦК применялись интегральные микросхемы средней степени интеграции 133 серии (см. рис. 3). ОЗУ, выполняющее роль цифровых линий задержки, было выполнено на микросхемах 134РУ6, которые представляли собой статическое оперативное запоминающее устройство с произвольной выборкой 1024x1 бит.

Теперь о Павле Михайловиче Чудакове, который родился 26 августа 1921 года. Советский учёный, специалист в области радиолокации, окончил отдельный военный факультет связи МИИС (1942, ныне МТУСИ). Участник Великой Отечественной войны. С 1946 по 1964 год работал в НИЭМИ, Москва. С 1954 года работал директором этого предприятия. В этот период Чудаков руководил созданием радиолокационной техники: станций оружейной наводки (СОН-4, СОН-15, СОН-30), радиоприборного комплекса (РПК-1 «Ваза»), приборов управления артиллерийским зенитным огнем (ПУАЗО-30-6, ПУАЗО-30), ЗРК «Круг». Кандидат технических наук (1952). С конца 1964 по 1980 год являлся директором «ВНИИРТ». Руководил разработкой многофункциональной РЛС «Машук» и полностью автоматизированной РЛС СТ-68. История создания РЛС «Машук» заслуживает особого внимания [6]. Это была серьёзная работа, заданная «ВНИИРТ» в

1965 году. РЛС «Машук» (5Н88) – трёхкоординатная многофункциональная РЛС кругового обзора с большой мощностью излучения, рассчитанная на обнаружение широкого класса целей с различными ЭПР (вплоть до целей с ЭПР 0,1–0,3 м²) в сложной помеховой обстановке (см. рис. 4).

С самого начала разработки прослеживалась тенденция получения высоких тактико-технических показателей при использовании мощного 64-канального передатчика на ЛБВ, электронного управления формой, передающей диаграммы, позволяющая получать обзорные и узконаправленные лучи; многочастотность зондирующего ЛЧМ-сигнала, применения автокомпенсаторов для повышения степени защиты от активных помех, принимаемых по боковым лепесткам.

Много сил было отдано разработке системы компенсации помех, системы перестройки излучаемых частот и особенно вопросам автоматической обработки информации с помощью ЭВМ «Гранит». В 1977 г. РЛС «Машук» успешно прошла государственные испытания и была принята на вооружение. На научно-техническом совете по рассмотрению результатов разработки РЛС «Машук» основоположник отечественной радиолокации академик Ю. Б. Кобзарев назвал станцию «шедевром», так как на время создания РЛС «Машук» она значительно превосходила все существующие в мире РЛС по своим тактико-техническим характеристикам (см. рис. 5). Однако исключительность характеристик РЛС потребовала большого аппаратного объёма. Промышленность не в состоянии была освоить серийное производство этой грандиозной РЛС. Так бесславно закончилась 12-летняя история «Машука», не получившая дальнейшего развития.

К великому сожалению, история РЛС «Машук» повторилась и с РЛС СТ-68. Решая вопрос о запуске РЛС СТ-68 в серию, заказчик, ссылаясь на высокую стоимость СТ-68, рекомендовал в производство упрощённый