

Перспективы использования технологии цифрового диагностикообразования для решения задач радиомониторинга.

Слюсар В.И., Д.Т.Н., ЦИВИТ ВС Украины

Постоянное усложнение электромагнитной обстановки, вызванное внедрением новых коммуникационных стандартов и расширением количества пользователей услуг связи, выдвигает жесткие требования к современным средствам радиомониторинга. Среди новых технологий, направленных на решение проблем в этой области, достаточно перспективной является технология цифровых антенных решеток (сокращенно ЦАР) или как ее иногда называют цифрового диагностикообразования. Ее теоретические основы были заложены еще в 60-е – 70-е годы прошлого века, но лишь в настоящее время с развитием микропроцессорной техники начался этап практической реализации накопленного научного задела.

В бывшем СССР одним из наиболее последовательных приверженцев этого направления явилась киевская научная школа, возглавляемая Заслуженным деятелем науки и техники Украины профессором Варюхиным В. А. Данным научным коллективом в Военной академии ПВО Сухопутных войск имени Василевского А.М. на протяжении 60-х – 90-х годов были созданы теоретические основы многоканального анализа со сверхразрешением сигналов, апробирован ряд макетов РЛС с цифровыми антенными решетками (ЦАР). Как следствие, к началу 90-х годов в СССР существовал весьма представительный ряд научных школ, совокупные достижения которых по многим теоретическим и практическим вопросам опережали аналогичные разработки за рубежом.

Что же такое цифровая антенная решетка?

Каковы преимущества ЦАР при решении задач радиомониторинга?

Согласно принятой среди специалистов классификации, цифровая антенная решетка – это антенная система, представляющая собой совокупность аналого-цифровых каналов с общим фазовым центром, в которой формирование диаграммы направленности осуществляется в цифровом виде.

Отличительной особенностью схемотехники ЦАР по сравнению с

традиционными фазированными антенными решетками (ФАР) является установка в каждом приемном канале вместо фазовращателей аналого-цифровых преобразователей, осуществляющих многоразрядное квантование сигналов по уровню и дискретизацию их во времени. Тактовые импульсы на все аналого-цифровые преобразователи должны разводиться от общего генератора с таким расчетом, чтобы АЦП всех приемных каналов срабатывали одновременно.

Типовая схема приемного сегмента ЦАР приведена на слайде.

Особенностью перспективных схемных решений метрового и соседнего с ним участка дециметрового диапазонов волн является оцифровка сигналов непосредственно на несущей частоте. При этом исключаются операции преобразования частоты, детектирования сигналов с выделением их огибающей, что сокращает энергетические потери, повышает чувствительность приемной системы и упрощает аппаратную реализацию.

Для согласования темпов диаграммообразования (сотни килогерц) с периодом дискретизации АЦП (десятки - сотни мегагерц) обычно применяют цифровые фильтры, накапливающие в жестко отведенных интервалах времени отсчеты сигналов, полученные с выходов АЦП. Помимо прореживания информационного потока без потерь в энергетике, такой принцип обработки позволяет декоррелировать шумы, осуществить дополнительную частотную селекцию, повысить отношение сигнал-шум за счет когерентного суммирования напряжений сигнальной смеси.

С помощью высокоскоростного интерфейса совокупность цифровых отсчетов напряжений сигналов поступает на процессор формирования характеристик направленности, ориентирующий максимумы лучей (“вторичных каналов”) требуемым образом. Процедура диаграммообразования осуществляется программным способом с помощью цифровых сигнальных процессоров (DSP) либо аппаратно с помощью программируемых логических интегральных схем (ПЛИС), выполняющих синфазное взвешенное суммирование напряжений всех первичных приемных каналов для интересующих угловых направлений.

Полученные отклики вторичных каналов далее независимо обрабатываются

множеством канальных процессоров, обеспечивающих селекцию сигналов по частоте, направлению и времени прихода, реализующих алгоритмы помехозащиты.

Рассмотренная нехитрая схема функционирования ЦАР уже отработана в серийных радиолокационных системах, ультразвуковой диагностической технике, а также в системах наземной мобильной связи на уровне демонстрационных проектов мобильной связи 4-го поколения.

Изложенный принцип цифрового диаграммообразования является достаточно общим, и в конкретных устройствах может претерпевать изменения, обусловленные возможностями элементной базы, конкретным опытом разработчиков и их теоретической подготовкой, объемами финансирования того или иного проекта.

В частности, в последнее время многие зарубежные фирмы довольно интенсивно изучают возможности реализации приемных каналов ЦАР по технологии программно реконфигурируемых радиомодулей (Software Radio), идеализированная схема типовой архитектуры которых представлена на слайде.

В основу схемотехнического замысла Software Radio положена тщательно согласованная интеграция процессора цифровой обработки сигналов (DSP или FPGA), АЦП и ЦАП.

Подобное построение каналов ЦАР позволяет избежать аппаратной зависимости процедур обработки сигналов и упрощает их адаптацию под нужды того или иного стандарта функционирования. Как справедливо отмечается в инженерных проспектах, на основе технологии цифрового диаграммообразования может быть получена максимальная унификация узлов и блоков аппаратуры, простота реконфигурации и модификации систем радиомониторинга, которая сводится зачастую лишь к замене их программного обеспечения.

При этом обеспечивается оптимизация ресурсно-функциональной адаптации архитектуры радиоэлектронного оборудования под конкретно решаемые в текущий момент времени задачи.

Ключевой особенностью функционирования ЦАР является, как уже

отмечалось, цифровое формирование лучей (ЦФЛ) характеристики направленности (ХН), которое позволяет эффективно реализовать динамическую адаптацию обслуживаемой зоны покрытия на основе оперативного перенацеливания цифровых приемных лучей по объектам контроля (слайд). Созвездие лучей, синтезируемое, например, по алгоритмам быстрого преобразования Фурье либо посредством классических процедур дискретного Фурье–анализа, является, по сути, совокупностью "пространственно-частотных фильтров", каждый из которых селективирует строго определенный набор сигналов и подавляет остальные, одновременно принимаемые в широком пространственном секторе, как помеховые.

При этом существенно улучшается качество радиомониторинга в условиях многолучевого распространения радиоволн (слайд), а также существенно повышается помехозащищенность системы в условиях интенсивного радиопротиводействия. Этому способствует цифровое формирование в программно реконфигурируемых каналах высокоидентичных частотных фильтров на выходах приемных устройств, в совокупности с наращиванием динамического диапазона при накоплении отсчетов напряжений в процессе пространственно-временной обработки (слайд).

Немаловажным достоинством ЦАР является также сокращение времени формирования радиомониторинговых изображений за счет одновременного многолучевого приема сигналов во всем рабочем секторе. Реализация сверхрелеевской разрешающей способности по направлениям прихода сигналов, частоте и времени задержки способствует достижению требуемой детализации панорамных срезов пространственной обстановки.

В качестве примера на слайде проиллюстрирован эффект сверхрелеевского разрешения по угловой координате двух точечных источников с помощью алгоритма MUSIC [2]. Нетрудно заметить, что традиционная обработка (верхняя кривая) не позволяет получить визуальное разрешение, тогда как процедура MUSIC отчетливо выдает два обособленных отклика. Следует подчеркнуть, что в настоящее время известно достаточно представительное множество методов

сверхразрешения, реализация которых, в зависимости от отношения сигнал/шум, позволяет отдельно селектировать до десяти и более точечных объектов в пределах парциального лепестка приемной диаграммы направленности ЦАР. В целом же цифровое формирование луча обеспечивает близкие к потенциальным точность оценивания параметров сигналов и их разрешение.

Главной проблемой при использовании ЦАР в системах радиомониторинга является обеспечение широкой полосы приема. Для ее решения могут использоваться известные подходы, основанные на применении широкодиапазонных решеток, предварительной частотной селекции сигналов и формировании диаграммы направленности с учетом измеренных несущих.

Полнота реализации перечисленных и ряда других преимуществ ЦАР во многом зависит от качественных параметров используемой элементной базы.

Понимая роль данного ключевого фактора, многие зарубежные фирмы ориентируются на создание собственных комплектующих, характерным примером чему может служить шведская программа “Радар на одном чипе”, в рамках которой отработана двухчипная концепция приемного канала ЦАР для радиотехнических систем X-диапазона (8 - 12 ГГц).

Другим направлением в развитии элементной базы ЦДО является создание специализированных модулей многоканальной обработки сигналов. Номенклатура доступных на мировом рынке устройств такого рода достаточно разнообразна [5] и может быть классифицирована по типу интерфейса, используемого для выдачи результатов обработки на диаграммообразующий модуль (PCI, CompactPCI, VME, FPDP и т. д.), в зависимости от вида интегральной схемы спецвычислителя (DSP или ПЛИС), по конструктивному признаку (монолитная или мезонинно-модульная).

С точки зрения удобства совместимости с программным обеспечением компьютеров линии Intel PC, предпочтительным выбором являются решения в классе интерфейсов PCI и CompactPCI. Например, на слайде показан вариант размещения модулей на PCI-кросс-плате. В приложениях, критичных к условиям эксплуатации, как правило, PCI-концепция не получает развития и выбор

происходит в пользу CompactPCI-модулей или VME-устройств, несмотря на их дороговизну.

Использование ПЛИС в отличие от DSP-схемотехники позволяет жестко синхронизировать пошаговое выполнение алгоритмов обработки сигналов в многоканальных системах благодаря отказу от использования аппаратных прерываний. Во многом по этой причине ПЛИС-направление в обработке сигналов существенно потеснило рынок процессорных систем и заняло рекордные по достигнутым показателям позиции. Так, например, английская компания Nallatech Ltd. поставляет CompactPCI-модули Venadic, содержащие двадцать 14-разрядных АЦП, имеющих тактовую частоту до 85 МГц и граничную полосу аналоговых входных сигналов более 250 МГц. Внешний вид “рекордсмена” приведен на слайде. Данный модуль относится к классу монолитных ПЛИС-устройств и в случае оцифровки квадратурных составляющих аналоговых сигналов позволяет сформировать цифровой отклик 10-канальной ЦАР, взяв на себя при необходимости функции цифрового формирования лучей.

Указанные модули могут использоваться для установки в многослотовые шасси (Backplane) с CompactPCI-интерфейсом. Предельный вариант таких конструктивов рассчитан на 21-слотовую компоновку, что при использовании одного хост-процессорного модуля позволяет обработать квадратурные отклики 200 каналов ЦАР.

В Украине в настоящее время наибольший практический опыт в создании ЦАР на современной элементной базе накоплен, на мой взгляд, в холдинговой компании “Укрспецтехника” (Киев). В отличие от разработок николаевских специалистов, ориентирующихся на микропроцессорную схемотехнику, последний вариант цифровой антенной решетки от “Укрспецтехники” использует модули на базе ПЛИС днепропетровской фирмы Пульсар Лтд., представленные на слайде. Каждый такой модуль обработки сигналов может содержать два 12-разрядных АЦП с частотой дискретизации до 80 МГц, ЦАП, буферное ОЗУ, ПЛИС с загружаемой конфигурацией на 50 или 150 тысяч вентилей. Стоимость одного модуля в зависимости от объема выпуска и типа используемой ПЛИС

составляет 500 – 700 у.е.

Завершая рассмотрение основных схемотехнических подходов к реализации ЦАР, следует отметить, что прогресс в повышении быстродействия АЦП и интерфейсов межмодульных соединений неизбежно расширит не только сферы применения ЦАР, но и функциональные возможности радиотехнических систем, созданных на их основе.

Перечень рассмотренных вариантов реализации ЦАР является далеко неполным и непрерывно расширяется. Интенсивность финансирования соответствующих НИОКР за рубежом и их многообразие подтверждают тезис о превращении ЦДО в основную технологию радиотехнических систем. С этим необходимо считаться, планируя направления научных исследований в интересах разработки специальной техники радиомониторинга.