

# ИНТЕГРАЛЬНЫЕ РАДИОЭЛЕКТРОННЫЕ УСТРОЙСТВА

УДК 621.396.67

## Особенности проектирования цифровых антенных решеток

*В.И.Орешкин, К.С.Лялин, Ж.В.Чиркунова*

Московский государственный институт электронной техники  
(технический университет)

Рассмотрены задачи, возникающие при проектировании цифровой антенной решетки. Представлены результаты исследования влияния параметров АЦП на характеристики системы, проведено моделирование с целью исследования влияния амплитудно-фазового разброса на выстраиваемую диаграмму направленности.

В настоящее время быстрыми темпами развиваются беспроводные системы связи и беспроводные сети передачи данных. Основными проблемами являются ограниченное использование частотных ресурсов и помехозащищенность радиоканалов. Проблемы такого рода можно решать использованием технологий пространственного разделения каналов на базе цифровых антенных решеток (ЦАР) с возможностью цифрового диаграммообразования (ЦДО) [1–3].

Цель работы – исследование особенностей проектирования и моделирования цифровых и аналоговых блоков ЦАР.

ЦАР представляет собой антенную решетку с интегрированными цифро-аналоговыми и аналого-цифровыми преобразователями, а также процессором, который решает задачу анализа и обработки сигнала и радиообстановки в целом с последующим построением необходимой диаграммы направленности (ДН) для адаптивного подавления помех. Посредством цифровой обработки сигналов ЦАР позволяет улучшить характеристики покрытия и увеличить емкость сетей передачи данных [1].

Рассмотрим ряд функциональных особенностей ЦАР по сравнению с обычными антенными системами на примере базовой станции мобильной связи. Обычная «всенаправленная» антенна излучает и принимает волны во всех направлениях. При этом во многих случаях эта излучаемая мощность становится помехой соседним базовым станциям и пользователям других сетей. Это приводит, в свою очередь, к снижению отношения сигнал/(шум+помеха) и ухудшению связи. В отличие от указанной всенаправленной системы ЦАР позволяет сфокусировать энергию непосредственно к заданному пользователю и сформировать ноль в направлении нежелательного сигнала.

Такая задача может быть решена с использованием аналоговой адаптивной антенной решетки, однако даже система, работающая с аналоговым сигналом, должна иметь в своем составе устройство, вырабатывающее сигналы управления весовыми коэффициентами, т.е. какой-либо микропроцессор. При этом для создания амплитудно-фазового распределения придется использовать аттенюаторы, что неизбежно ведет к потере энергетике полезного сигнала, который в дальнейшем подвергается обработке.

В ЦАР такой проблемы нет, поскольку работа ведется с набором данных и можно учесть неизбежные потери в уровне сигнала за счет амплитудного распределения путем подбора соответствующих множителей. Таким образом, ЦАР обеспечивает дополнительную степень свободы при разделении сигналов от различных пользователей, добавляя к уже широко применяемым частотному, временному и кодовому пространственное разделение сигналов [1, 3].

При разработке подобной системы необходимо определиться с частотой дискретизации сигнала и схемой канала ЦАР, поскольку от них напрямую зависит выбор элементной базы системы. Например, для схемы, в которой сигнал дискретизируется на промежуточной частоте, требуется более быстрый АЦП, а схема с дискретизацией на низкой частоте не так требовательна к АЦП, но необходима максимальная идентичность каналов, что при использовании аналоговых устройств в канале не легко достигается. Кроме выбора частоты, также следует определить, где будет происходить выделение квадратурных составляющих, до или после оцифровки сигнала. В идеале оцифровка сигнала могла бы проводиться на высокой изначальной частоте сигнала, с последующей обработкой, но в настоящее время такая схема недоступна из-за отсутствия необходимых для этого супербыстродействующих АЦП. Например, для оцифровки сигнала ЦАР 2,4 ГГц, потребуется частота дискретизации 4,8 ГГц. Применение подобных АЦП не оправдывает себя вследствие большой дороговизны таких устройств (частота дискретизации доступных промышленных АЦП менее 400 МГц). Кроме того, учитывая определенное число бит на выборку для обеспечения необходимого количества уровней квантования, цифровым вычислителям придется справляться с огромным потоком данных.

Рассмотрим два наиболее общих способа получения квадратурных составляющих:

- получение квадратур аналоговыми средствами и дальнейшее преобразование каждой из квадратур в цифровой вид с помощью аналого-цифрового преобразования;
- выполнение аналого-цифрового преобразования и разделение на квадратуры в цифровом виде.

На рис.1 приведен вариант построения цифрового приемника с разделением квадратур аналоговыми средствами. Сигнал с антенны через усилитель подается на первый смеситель и далее через полосовой фильтр поступает на второй смеситель, с выхода которого получаем две квадратурные составляющие, каждая из которых проходит через НЧ-фильтр и преобразуется в цифровую форму для дальнейшей обработки.

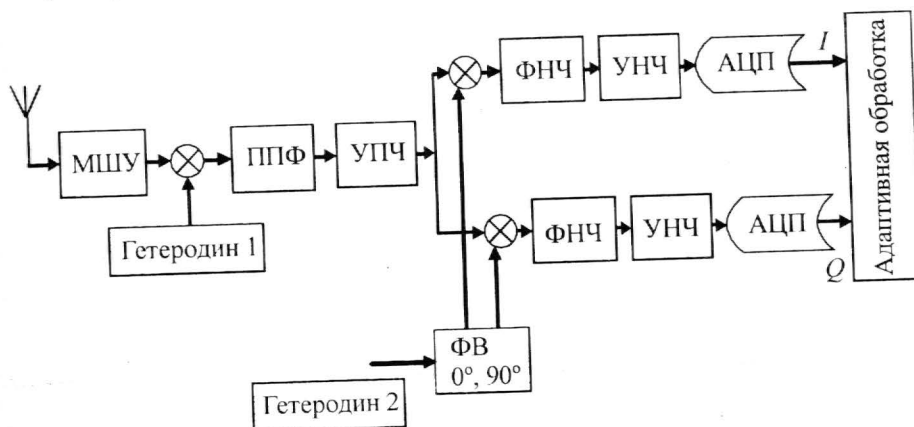


Рис. 1. Цифровой приемник с разделением квадратур аналоговыми средствами

Данное преобразование имеет свои недостатки:

- из-за применения аналоговых устройств трудно получить одинаковые характеристики для двух квадратур;
- вследствие возможной нестабильности синтезаторов нарушается ортогональность преобразования;
- фазовая характеристика из-за наличия нелинейных элементов неравномерна.

В данном случае требования к скорости преобразования АЦП невысокие и в основном определяются шириной информационного спектра.

На рис.2 показан вариант построения цифрового приемника с разделением квадратур цифровыми средствами. Приведенный способ осуществляет преобразование промежуточной частоты (ПЧ) в цифровую форму на более высокой частоте, а разделение квадратур происходит цифровым способом. Данный способ преобразования лишен недостатков предыдущей схемы и предоставляет широкий спектр возможностей по цифровой обработке сигнала. Вследствие того, что цифровой фильтр обладает значительно большей по сравнению с аналоговым фильтром крутизной, это позволяет с большей точностью выделять сигнал цифровыми методами. Но такая схема требует применения широкополосного быстродействующего АЦП и быстродействующих схем цифровой обработки [4].

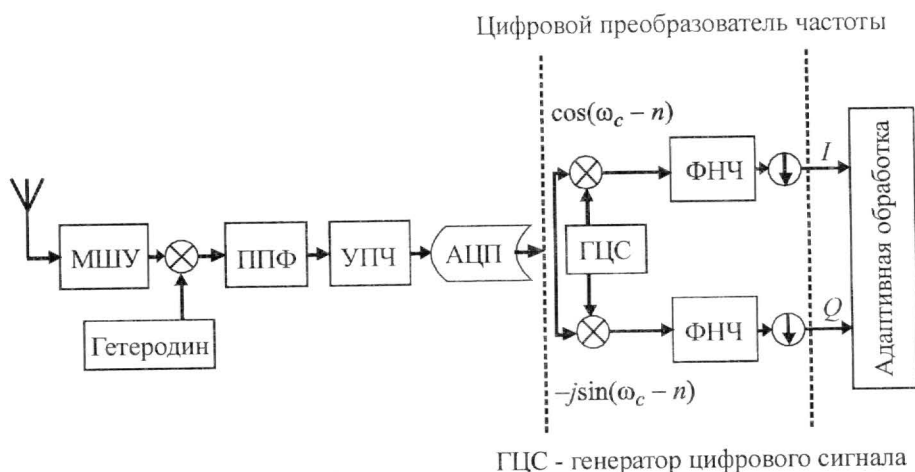


Рис.2. Цифровой приемник с разделением квадратур цифровыми средствами

Как видно из рис.1 и 2, оцифровку сигнала можно проводить, как на видеочастоте, так и на промежуточной частоте. Выбор схемы канала напрямую зависит от скорости и производительности АЦП, и наоборот, необходимые характеристики АЦП определяются выбором схемы канала.

Таким образом, важной задачей является выбор АЦП, использующихся в системе. Искажение сигнала при оцифровывании напрямую зависит от параметров АЦП. С целью получения минимального искажения сигнала при дискретизации необходимо определить минимальное количество уровней квантования, необходимое для удовлетворения заданному уровню искажений. Кроме того, на требуемое количество уровней квантования влияет количество элементов решетки, поэтому при проектировании антенны следует помнить, что для достижения заданного динамического диапазона необходимо увеличение количества уровней квантования при уменьшении количества элементов решетки. Таким образом, задача определения количества бит квантования приводит к необходимости моделирования поведения системы при выборе определенных характеристик АЦП.

В 2003–2006 гг. на кафедре микроэлектронных радиотехнических устройств и систем (МРУС) МИЭТ были проведены исследования по созданию действующего макета системы пространственного подавления помех на базе 4-элементной ЦАР. Данный макет позволяет осуществить подавление двух сигналов помехи (количество подавляемых помех определяется ограничениями метода вычисления весовых коэффициентов), приходящих с известных направлений, формируя нули диаграммы направленности в этих направлениях и сохраняя положение основного лепестка неизменным. Для созданного прототипа была выбрана схема разделения квадратурных сигналов аналоговыми средствами на видеочастоте. Такой подход позволяет снизить требования к производительности АЦП и других цифровых блоков. Посредством разложения входного сигнала на две квадратурные  $I$ - и  $Q$ -составляющие решается задача представления входных сигналов в виде комплексных величин в цифровой диаграммообразующей схеме, которые именно в таком виде проходят дальнейшую обработку и умножаются на весовые коэффициенты. Задача получения квадратурных составляющих была эффективно решена использованием квадратурных демодуляторов, позволяющих получать низкочастотные квадратурные составляющие непосредственно из входного высокочастотного сигнала.

После того как получены низкочастотные аналоговые квадратурные составляющие, их необходимо перевести в цифровой код для дальнейшей обработки в диаграммообразующей схеме с наименьшими искажениями. Как уже упоминалось, величина искажений низкочастотного сигнала при его аналого-цифровом преобразовании определяется количеством уровней квантования, т.е. разрядностью АЦП. Для определения вносимых АЦП искажений было проведено математическое моделирование формирования результирующей ДН при использовании АЦП с различной разрядностью.

На рис.3 представлены результаты расчета ДН 4-элементной решетки с межэлементным расстоянием, соответствующим реальному макету, для непрерывного сигнала (сплошная линия), при наличии 2-разрядного АЦП в канале (штриховая линия) и при наличии 5-разрядного АЦП (штрихпунктирная). Из рисунка видно, что для формирования луча ДН на выходе сумматора достаточно оцифровывать входной сигнал с точностью до 5 бит квантования, поскольку кривая, соответствующая 5 битам квантования практически не отличается от кривой для непрерывного сигнала в канале. Однако 5 бит квантования достаточно только в случае наличия единственного сигнала на входе каждого канала, в противном случае, для того, чтобы правильно оцифровывать сигналы, отличающиеся по уровню, например на 20 дБ, необходимо добавить еще 4 бита. В результате требуется наличие девяти разрядов у АЦП. С этой точки зрения для создания действующего макета ЦАР был выбран АЦП, предназначенный для оцифровки квадратурных составляющих сигналов с точностью 10 бит и скоростью 20MSPS.

Далее оцифрованный сигнал поступает на вычислительный блок. В разработанном макете вычислительный блок реализован на базе программируемой логической инте-

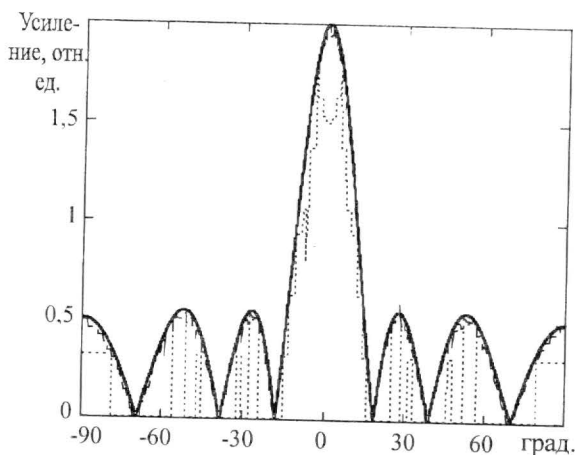


Рис.3. Оцифрованные и непрерывная ДН 4-элементной решетки

гальной схемы (ПЛИС) и цифрового сигнального процессора (ЦСП). В ПЛИС происходит умножение принимаемого сигнала на весовые коэффициенты, которые вычисляются непосредственно, исходя из направления на сигнал и помеху. ЦСП осуществляет управление решеткой.

При создании макета направление на сигнал и помеху считалось априори известным, однако при создании реальных систем связи следует учитывать, что столь подробная информация отсутствует, а следовательно, придется использовать более сложные алгоритмы определения направления прихода сигнала и адаптации, например MUSIC-алгоритм.

Кроме того, следует отметить, что реализованный в макете метод формирования заданной диаграммы направленности работает в предположении об идеальной идентичности каналов решетки, но в любой реальной системе существует разброс между каналами из-за неполной идентичности усилителей, схем преобразования частоты и т.д. Это приводит к неточностям в процессе выставления положения главного максимума и минимумов («нулей») ДН, а также к изменению их уровней.

На рис.4 показаны результаты моделирования по формированию ДН макета ЦАР. Как видно из рисунка, для достижения необходимой глубины подавления необходимо обеспечить ограничение амплитудно-фазового разброса в пределах 0,7 дБ и 6,5°.

На рис.5 представлены результаты моделирования влияния амплитудно-фазового разброса на ДН многолучевой ЦАР, разрабатываемой в настоящее время на кафедре. Из рисунка явно видно, что разброс влияет как на уровень перекрытия лучей, так и на уровень боковых лепестков.

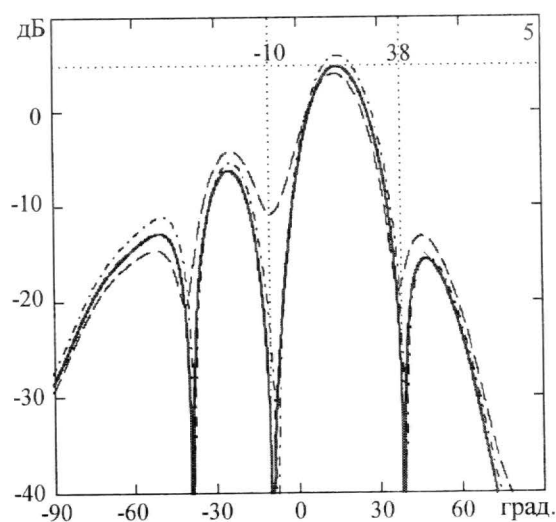


Рис.4. Влияние амплитудно-фазового разброса на диаграмму направленности макета ЦАР (— без разброса; ---- 1 дБ, 13°; ..... 0,7дБ, 6,5°)

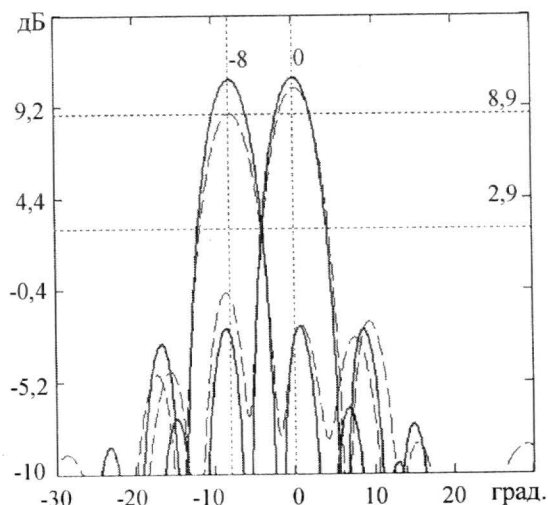


Рис.5. Искажение ДН многолучевой ЦАР вследствие амплитудно-фазового разброса (— без разброса; ---- с учетом разброса)

Следовательно, при создании ЦАР необходимо либо добиваться максимальной идентичности каналов, либо отслеживать амплитудно-фазовый разброс с последующей компенсацией искажений при помощи внесения в цифровые данные дополнительных коэффициентов.

На сегодняшний день исследования построения ЦАР продолжают с целью усовершенствования подобных разработок. Быстрое развитие вычислительной техники делает возможным переход антенной техники и радиотехники в целом на новый качественный уровень. Кроме того, развитие и удешевление элементной базы может значительно снизить стоимость подобных антенных систем, что позволяет надеяться на широкое распространение цифровых антенных решеток и использование их преимуществ.

### Литература

1. *Liberti J.C., Rappaport T.S.* Smart antennas for wireless communications. – NJ: Prentice Hall PTR, USA, 1999. – 377 с.
2. *Слюсар В.И., Заблоцкий М.А.* Цифровые антенные решетки в зарубежных системах мобильной связи // Зв'язок. – 1999. – № 1. – С. 50–53.
3. Активные фазированные антенные решетки / Под ред. *Д.И.Воскресенского, А.И.Канащенкова*. – М.: Радиотехника, 2004. – 488 с.
4. *Kim M, Ichige K, Arai H.* FPGA-based DSP implementation of simple MRC beamformer Div. of Electr. & Comput. Eng., Yokohama Nat. Univ. ([http://ieeexplore.ieee.org/xpl/freeabs\\_all.jsp?arnumber=985442](http://ieeexplore.ieee.org/xpl/freeabs_all.jsp?arnumber=985442)).

Статья поступила  
19 ноября 2007 г.

**Орешкин Виталий Иванович** – аспирант кафедры микроэлектронных радиотехнических устройств и систем (МРТУС) МИЭТ. *Область научных интересов:* цифровая обработка сигналов и антенно-фидерные устройства.

**Дялин Константин Сергеевич** – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры МРТУС МИЭТ. *Область научных интересов:* антенно-фидерные устройства.

**Чиркунова Жанна Владимировна** – аспирант кафедры МРТУС МИЭТ. *Область научных интересов:* антенно-фидерные устройства, цифровая обработка сигналов.

### Информация для читателей журнала «Известия высших учебных заведений. Электроника»

С тематическими указателями статей за 1996 - 2007 гг., аннотациями и содержанием последних номеров можно ознакомиться на нашем сайте:

<http://www.miet.ru/static/je/os.html>