

На правах рукописи

Шмачилин Павел Александрович

ХАРАКТЕРИСТИКИ БОРТОВЫХ ЦИФРОВЫХ АФАР СВЧ

Специальность 05.12.07 – «Антенны, СВЧ – устройства и их технологии»

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Москва – 2011

Работа выполнена на кафедре радиофизики, антенн и микроволновой техники Московского авиационного института (государственного технического университета).

Научный руководитель - доктор технических наук, профессор
Воскресенский Дмитрий Иванович

Официальные оппоненты - доктор технических наук
Гаврилов Константин Юрьевич
- доктор технических наук, профессор
Нечаев Евгений Евгеньевич

Ведущая организация: Таганрогский государственный радиотехнический университет им. В. Д. Калмыкова (ТРТУ)

Защита состоится «27» сентября 2011 г. в 10 часов на заседании диссертационного совета Д 212.125.03 при Московском авиационном институте по адресу: 125993, г. Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, д. 4.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке Московского авиационного института (125993, г. Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, д. 4).

Автореферат разослан « » июня 2011г.

Учёный секретарь
диссертационного совета

Сычёв М.И.

I. Общая характеристика работы

Актуальность темы диссертации

В современных радиотехнических системах связи, радиомониторинга, радиолокации и навигации предъявляются всё более жёсткие требования к широкополосности и массогабаритным параметрам антенных систем.

В последнее время возникла необходимость создания интегрированных антенных систем, обеспечивающих одновременную работу на нескольких частотах при широкоугольном электрическом сканировании антенной решётки (АР). К таким активным антенным решёткам (АФАР) предъявляется достаточно широкий круг требований к характеристикам антенны, используемым сигналам, а также ряд других общетехнических требований. Построение АФАР следует проводить с применением современной или перспективной элементной базы и соответствующих алгоритмов обработки сигналов.

До настоящего времени элементная база позволяла применять цифровую обработку сигнала (ЦОС) в антенных решётках лишь в метровом и дециметровом диапазоне длин волн. Наибольший интерес представляет применение ЦОС в антенных системах СВЧ, устанавливаемых на борту ЛА, например, в самолётных РЛС сантиметрового диапазона. Под АФАР бортовых РЛС (БРЛС) будем понимать решётки с числом элементов порядка не более нескольких сотен. Применение цифровой обработки в таких системах позволяет построить перспективные антенны с электрическим сканированием (*Smart-антенны*), обладающие возможностями адаптации и самонастройки.

Построение цифровой активной фазированной антенной решётки (ЦАФАР) связано с разработкой схем цифрового диаграммообразования (ЦДО), алгоритмов ЦОС, обеспечивающих требуемые характеристики направленности в нужном частотном диапазоне и на существующей элементной базе.

Реализация различных схем построения и алгоритмов ЦДО даёт возможность получения новых функциональных возможностей, например, создания многолучевых антенн (МЛА) с независимым управлением по каждому лучу. Эти задачи представляют как научный, так и практический интерес.

Определение взаимосвязи характеристик направленности, а также энергетических характеристик ЦАФАР, со схемой построения ЦДО и обобщёнными параметрами алгоритмов ЦОС является актуальной научно-технической задачей.

Цель и задачи работы

Целью данной работы является определение взаимосвязи между характеристиками направленности фазированных антенных решёток (ФАР) и обобщёнными характеристиками алгоритмов ЦОС; разработка математической модели процессов, протекающих в ЦАФАР для имитационного моделирования характеристик направленности и режимов работы системы при различной шумовой обстановке и параметрах сигнала падающей волны.

В соответствии с поставленной целью в диссертационной работе требуется решение следующих основных задач:

1. Обзор литературы по технологиям, применяемым в прототипах современных ЦАФАР, необходимый для дальнейшего развития теории ЦОС в АФАР СВЧ диапазона. Анализ современной элементной базы ЦОС и перспективных разработок, которые могут быть применены в ЦАФАР.

2. Определение зависимости характеристик направленности АФАР с ЦДО на СВЧ в зависимости от шумовой обстановки, условий работы и обобщённых параметров алгоритмов ЦОС.

3. Разработка имитационной модели ЦАФАР, учитывающей процессы преобразования входного аналогового сигнала в цифровую форму для различных видов входного «полезного» сигнала при наличии шума. Определение на основе построенной модели зависимостей характеристик направленности ЦАФАР от вида сигнала, соотношения сигнал/шум и элементной базы ЦОС (разрядность кода, частота дискретизации, величина шума джиттера).

4. Определение требований к быстродействию алгоритмов ЦОС в диаграммообразующей схеме, в зависимости от характеристик направленности, широкополосности и функциональных возможностей ЦАФАР.

5. Анализ ЦОС в АФАР на СВЧ с целью расширения функциональных возможностей, улучшения характеристик быстродействия, широкополосности, формирования диаграмм направленности специальной формы и т.д.

Методы исследований

Электродинамические методы теории антенн, численные методы математического анализа, системы математического моделирования, а также методы цифровой обработки сигнала.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Проведено исследование характеристик АФАР при цифровом формировании ДН методами дискретного и матричного преобразования Фурье, а также на основе цифровых линий задержки.

2. Определены требования к характеристикам и параметрам цифровых каналов, системы формирования и управления лучом ЦАФАР для обеспечения характеристик направленности и сканирования.

3. Предложено увеличение шага приёмной ЦАФАР без ухудшения уровня боковых лепестков и падения КНД в разреженной решётке, а также субдискретизация аналого-цифрового преобразования СВЧ сигнала для снижения требований к быстродействию.

4. Выявлены функциональные возможности применения цифровой обработки в АФАР: многолучевой режим работы с возможностью независимого формирования и управления формой ДН в каждом из лучей; цифровое формирование ДН специальной формы; моноимпульсная обработка.

Практическая значимость результатов работы

Проведённое аналитическое исследование и численный анализ показывают практическую возможность построения многофункциональной ЦАФАР БРЛС на современной или перспективной элементной базе ЦОС.

Предложенный вариант конструкции ЦАФАР с разреженным шагом излучателей позволяет улучшить энергетические характеристики полотна ЦАФАР.

Достоверность полученных результатов

Достоверность подтверждается совпадением расчётных характеристик систем с характеристиками, полученными методом численного имитационного моделирования, а также, в частных случаях, совпадением полученных результатов с известными из современной теории антенн.

Апробация результатов работы

1. Основные результаты диссертационной работы докладывались, обсуждались и получили одобрение на 8 научно-технических конференциях: «Современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций «РТ» (СевНТУ, Украина, г. Севастополь 2009, 2010 г.), «Информационные технологии и радиоэлектронные системы» (МАИ, Россия, г. Москва, 2009, 2010, 2011 г.), «Международная аэрокосмическая школа» (МАИ, Украина, г. Алушта, 2009г.), «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии «КрыМиКо» (СевНТУ, Украина, г. Севастополь, 2009, 2010 г.). Материалы диссертации также были использованы в выполняемых НИОКР «Фазотрон-МАИ».

Публикации

По основным результатам выполненных в диссертации исследований опубликованы 3 статьи в журналах, включённых в перечень ВАК.

Основные положения, выносимые на защиту

- Зависимости направленных свойств АФАР при использовании методов цифровой обработки сигнала непосредственно в полотне решётки на несущей частоте.
- Возможность построения цифровых приёмных систем на современной элементной базе цифровой обработки сигнала.
- Допустимость применения субдискретизации при цифровой обработке сигнала в АФАР, позволяющей понижать на порядок тактовую частоту АЦП и требуемое быстродействие с обеспечением необходимых направленных свойств.
- Увеличение шага в приёмной ЦАФАР с сохранением уровня КНД, соответствующего полностью заполненной апертуре.

Объем и структура работы

Диссертационная работа изложена на 150 машинописных страницах и состоит из введения, 4 глав, заключения, списка сокращений и списка литературы. Графический материал представлен в виде 69 рисунков и 3 таблиц. Список использованных источников включает 102 наименования на 9 страницах.

Личный вклад

Выводы основных теоретических зависимостей, представленных в диссертации, получены лично автором или при его непосредственном участии. Автор лично участвовал в разработке численной модели и методик определения направленных свойств ЦАФАР, а также в определении структурных затрат на построение цифровой решётки.

II. Краткое содержание работы

Введение

Во введении показано обоснование актуальности темы диссертационной работы, сформулирована цель работы, перечислены основные положения, выносимые на защиту. Приведена структура диссертации, форма апробации и внедрения результатов.

Глава 1. Цифровые антенные решётки

В первой главе содержится обзор и анализ материалов российских и зарубежных открытых источников по тематике, связанной с цифровой обработкой сигнала в антенных решётках. Выявлена целесообразность исследования основных вопросов диссертационной работы. Проанализированы варианты схем построения ЦАФАР, в том числе, с преобразованием частот. Рассмотрены существующие на данный момент аналоги ЦАФАР.

Современная элементная база позволяет производить обработку сигнала в реальном масштабе времени на частотах до 4 ГГц, что позволяет говорить о возможности построения систем ЦАФАР с прямым преобразованием аналог-цифра непосредственно в полотне АР на СВЧ для нужд БРЛС. В системах подобного ро-

да на структурном уровне может быть решена задача адаптации, автоматической калибровки, тестирования и автоподстройки.

Одним из ключевых элементов ЦОС является преобразователь аналог-цифра (ЦАП/АЦП). В первом приближении, оба устройства можно рассматривать по одному ряду параметров: частота дискретизации и разрядность кода. Поэтому в работе рассматривается лишь АЦП, считая, что к ЦАП будут предъявляться те же требования.

Помимо преобразователей важную роль в ЦОС играют сигнальные процессоры (СП), производящие математические и логические преобразования входного цифрового сигнала. Главной их характеристикой в области цифровых антенных решёток является быстродействие.

В работе приведён обзор выполненных разработок РЛС с ЦАФАР.

Цифровая обработка сигнала рассмотренных в обзоре систем осуществляется путём использования предварительной аналоговой обработки (рис.1.а.). Это связано с недостаточным быстродействием первоначальной цифровой элементной базы. На рис. 1.б приведена схема построения цифрового диаграммообразования (ЦДО) без преобразования частоты для быстродействующей элементной базы ЦОС.

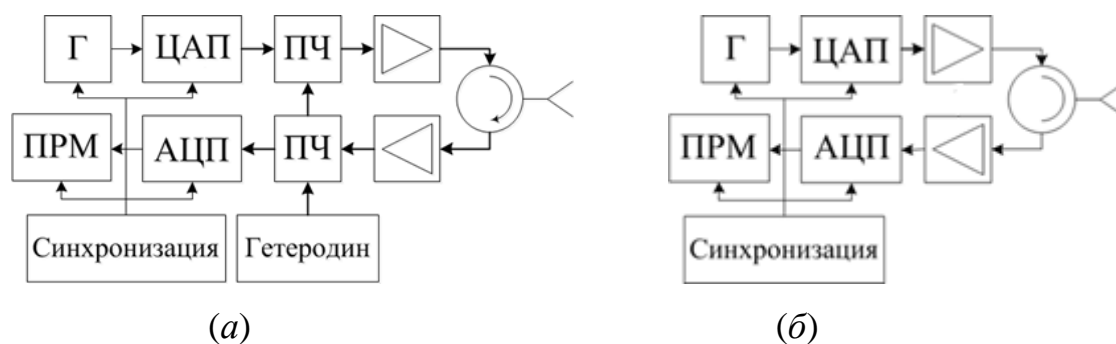


Рис.1. Схема ЦДО: а) с преобразованием частоты; б) без преобразования частоты.

Значительный интерес представляет получение общих соотношений для ЦАФАР в зависимости от основных характеристик ЦОС: частоты дискретизации, вида и параметров АЦП/ЦАП, отношения сигнал/шум на входе приёмной антенной решётки, выбора рациональной схемы построения. При этом необходимо учесть существующую элементную базу: АЦП/ЦАП, сигнальные процессоры и шины передачи данных. Важны стоимостные, энергетические, массогабаритные

характеристики элементной базы ЦОС, а также влияние шумов и помех на функционирование цифровой активной фазированной антенной решётки в целом.

Глава 2. Характеристики антенных решёток при цифровом формировании диаграммы направленности

Во второй главе диссертации определены характеристики направленности АФАР для различных методов цифрового формирования ДН и отношений сигнал/шум.

Теория ЦАФАР совмещает в себе теории фазированных антенных решёток и цифровой обработки сигнала. Отличие цифровых АР от аналоговых заключается в том, что для формирования выходного сигнала в диаграммообразующей схеме решётки применяются цифровые алгоритмы.

ЦАФАР представляет собой совокупность цифровых пространственных каналов, на выходе каждого из которых существует свой цифровой сигнал. Каждый из этих сигналов является результатом оцифровки в АЦП аналогового СВЧ сигнала, принятого от антенного элемента. Все цифровые сигналы сводятся в единую схему ЦДО, формирующую ДН ЦАФАР.

В дальнейшем в работе рассматривается влияние параметров только цифровой части на характеристики направленности АФАР. Будем считать, что аналоговая часть системы идеальна и не вносит искажений в процесс обработки. Входной аналоговый сигнал ЦАФАР рассматривается, как сигнал на входе АЦП. При этом учитывается наличие шума в сигнале волны, падающей на апертуру ЦАФАР. Для анализа была выбрана модель аддитивного белого гауссовского шума, спектральная плотность мощности (СПМ) которого нормирована к мощности входного «полезного» сигнала и задаётся в виде отношения сигнал/шум (с/ш), обозначенного как q .

В процессе аналого-цифрового преобразования присутствуют искажения сигнала, вызванные процессами квантования, дискретизации, шумом джиттера. Ввиду нелинейности вольт-кодовой характеристики АЦП, искажения также будут вносить шум входного сигнала. Каждое из перечисленных искажений будет приводить к амплитудным и фазовым ошибкам в полотне ЦАФАР. На направленные

свойства решётки наибольшее влияние оказывают фазовые ошибки, поэтому в работе проводится оценка фазовых ошибок аналого-цифрового преобразования в ЦАФАР. Ошибки по апертуре имеют равномерное распределение и статистически независимы, как известно из статистической теории антенн. Суммарная фазовая ошибка будет определяться следующим образом:

$$\Delta\varphi_{\Sigma}^{ЦОС} = \Delta\varphi_d + \Delta\varphi_j + \Delta\varphi_k + \Delta\varphi_N, \quad (1)$$

где $\Delta\varphi_d$ – фазовая ошибка, вызванная процессом дискретизации,

$\Delta\varphi_j$ – фазовая ошибка, вносимая шумом джиттера,

$\Delta\varphi_k$ – фазовая ошибка, возникающая в процессе квантования,

$\Delta\varphi_N$ – фазовая ошибка, возникающая под действием шума во входном аналоговом сигнале.

Фазовая ошибка дискретизации находится через период (частоту) дискретизации и период (частоту) сигнала:

$$\Delta\varphi_d = \frac{2\pi \frac{\Delta t_d}{T_0}}{2}, \quad (2)$$

$$\Delta\varphi_d = \pi F_{\max} \Delta t_d, \quad (3)$$

где Δt_d – период дискретизации.

F_{\max} – максимальная частота в спектре сигнала.

Фазовая ошибка шума джиттера может быть выражена аналогичным образом:

$$\Delta\varphi_j = \pi \frac{\Delta t_j}{\Delta t_d} = \pi \Delta t_j f_d. \quad (4)$$

Фазовая ошибка квантования возникает вследствие округления амплитуды квантуемого сигнала – появления шума квантования. Она может быть найдена через число разрядов кода АЦП:

$$\Delta\varphi_k = \frac{\pi}{2^n}, \quad (5)$$

где n – число разрядов кода АЦП.

Фазовая ошибка, вызванная наличием шума во входном аналоговом сигнале, выражается аналогично фазовой ошибке квантования: через ширину шумовой дорожки в среднем за период гармонического процесса:

$$\Delta\varphi_N = \frac{\pi}{2} \frac{1}{\sqrt{q}}. \quad (6)$$

Таким образом, суммарная фазовая ошибка будет зависеть от частоты дискретизации, величины шума джиттера, числа разрядов кода АЦП и отношения мощности сигнала к мощности шума (рис.2). Поэтому, если учесть, что процессы, протекающие в схеме ЦДО, аналогичны процессам в диаграммообразующей схеме коммутационных антенн, то для оценки направленных свойств ЦАФАР, в данном случае, можно применить известное из статистической теории антенн соотношение с использованием найденных выше фазовых ошибок:

$$D = D_0 \left(\frac{\sin\left(\frac{\Delta\varphi_{\Sigma}^{ЦОС}}{2}\right)}{\frac{\Delta\varphi_{\Sigma}^{ЦОС}}{2}} \right)^2 = D_0 \mu(\Delta\varphi_{\Sigma}^{ЦОС}), \quad (7)$$

где D – КНД антенной решётки при наличии фазовых ошибок,

D_0 – КНД идеальной апертуры,

$\Delta\varphi_{\Sigma}^{ЦОС}$ – величина фазовой ошибки ЦОС в апертуре решётки,

$\mu(\Delta\varphi_{\Sigma}^{ЦОС})$ – зависимость падения КНД от фазовой ошибки ЦОС в АР.

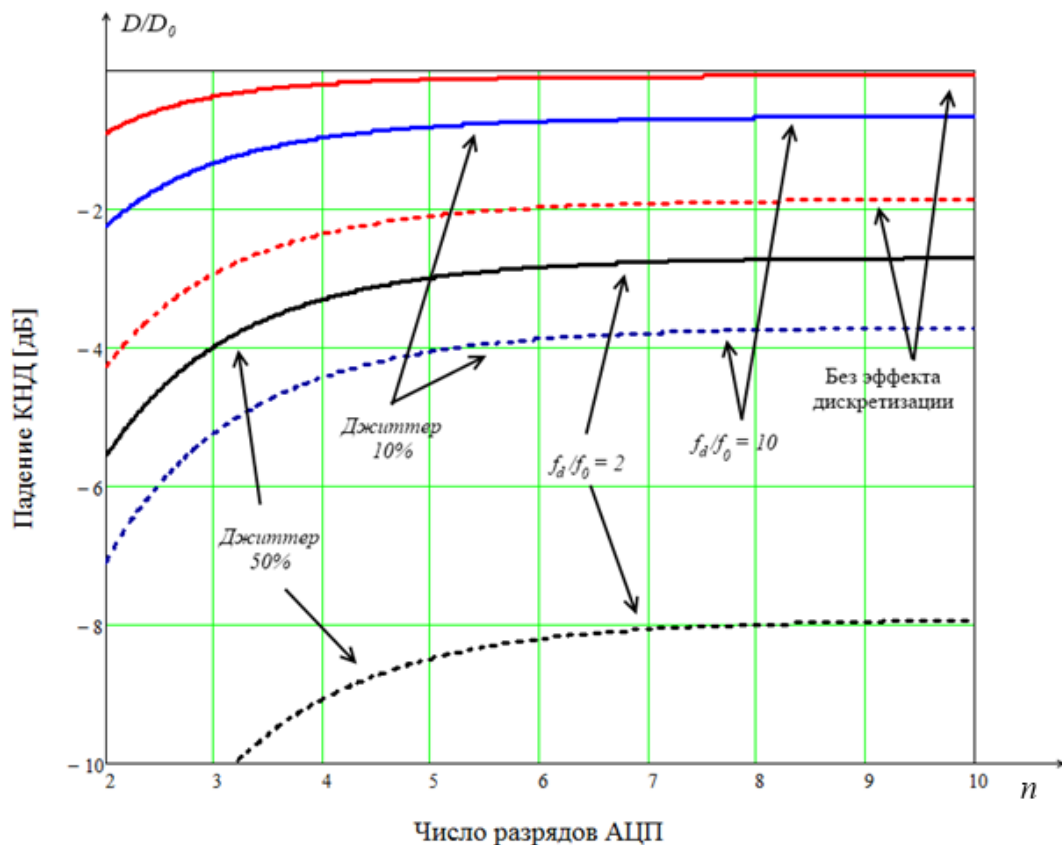


Рис.2. Зависимость величины падения КНД от числа разрядов АЦП

Таким образом, проведённый анализ показал, что переход к цифровой обработке сигнала в апертуре решётки приводит к возникновению фазовых ошибок, сказывающихся на направленных свойствах ЦАФАР и порождаемых преобразованиями сигнала из аналоговой формы в цифровую, алгоритмами ЦОС, неидеальностью цифровой элементной базы, а также наличием шумовой составляющей во входном аналоговом сигнале.

Глава 3. Моделирование характеристик ЦАФАР

В третьей главе диссертации представлена численная имитационная модель процесса прохождения сигнала через цифровую часть канала линейной и плоской ЦАФАР. Приведены результаты моделирования линейной и плоской цифровой антенной решётки при различных параметрах цифровой элементной базы. Исследованы зависимости КНД и уровня боковых лепестков от частоты дискретизации и разрядности АЦП при различных отношениях сигнал/шум на входе цифрового канала ЦАФАР.

Комплексное аналитическое исследование влияния процессов ЦОС на антенные характеристики связано с одновременным учётом большого количества параметров устройств и процессов обработки сигнала в ЦАФАР. В ходе анализа необходимо учесть достаточно большое количество факторов на различных этапах обработки сигнала в ЦАФАР. Поэтому целесообразно провести численное имитационное моделирование процессов, протекающих в цифровой части решётки при формировании ДН. Для этих целей в рамках работы была создана имитационная модель цифровой части АР, структура которой показана на рис.3.

Достоверность результатов моделирования проверена путём решения тестовой задачи моделирования идеальной ФАР (рис.4).

В результате моделирования были получены численные зависимости направленных свойств цифровой решётки от параметров элементной базы. На рис.5 и 6 приведены зависимости нормированного КНД и УБЛ от отношения с/ш при различной разрядности кода АЦП. Определение КНД производилось численным интегрированием пространственной ДН, определённой с учётом влияния шума.

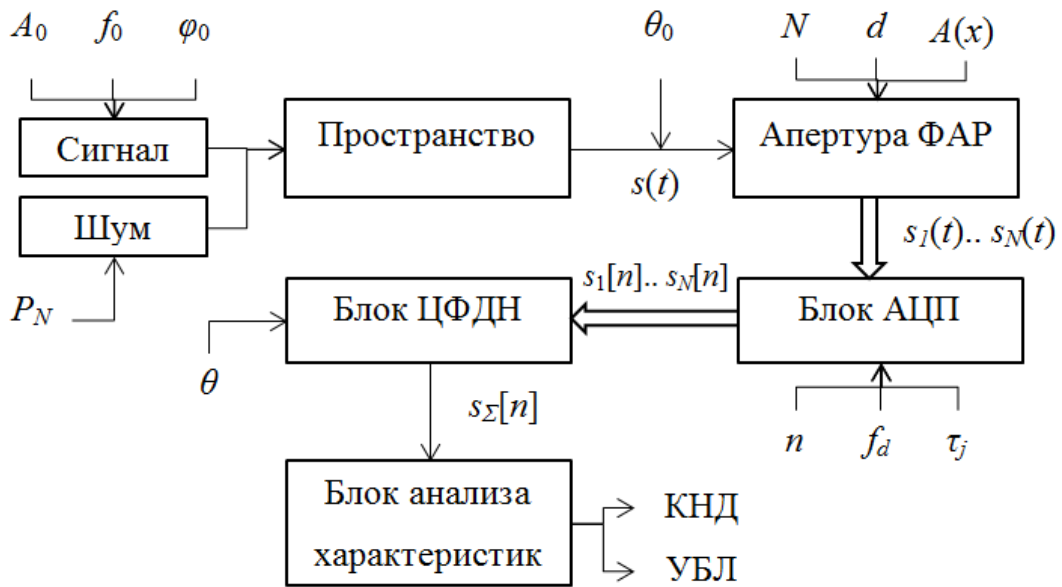


Рис.3. Структура модели цифровой части ЦАФАР.

На графиках (рис.5, 6) зависимостей КНД и УБЛ помимо результатов численного эксперимента, отмеченных точками, приведены зависимости КНД и УБЛ, рассчитанные аналитически (сплошные кривые).

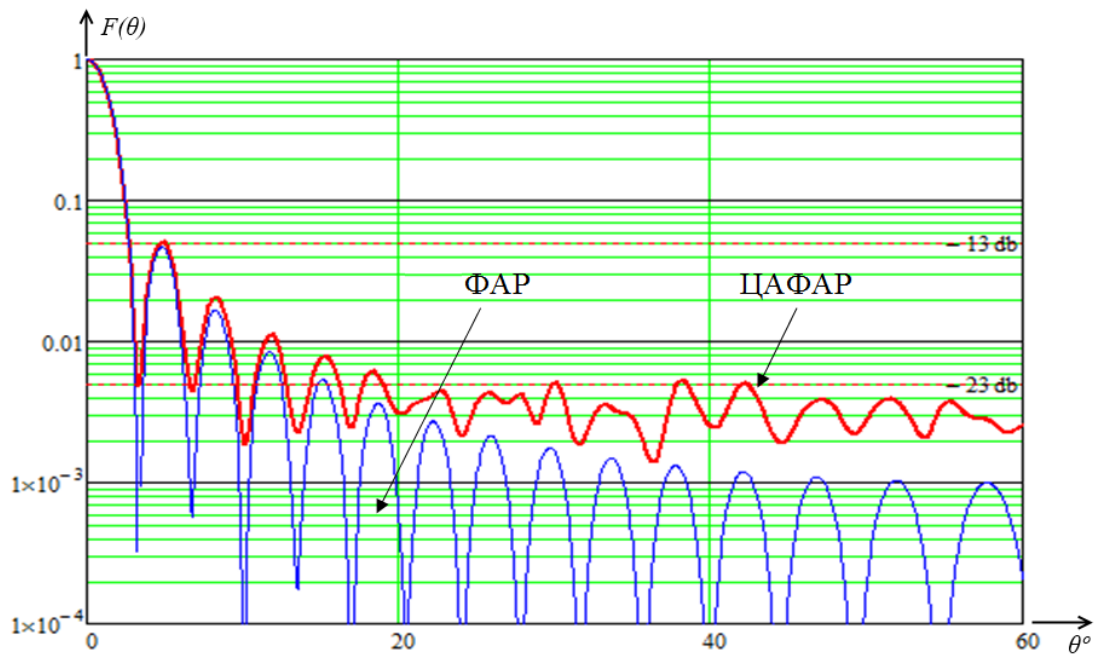


Рис. 4. Сравнение ДН ФАР с аналоговой и цифровой обработкой сигнала при $q = 10$.

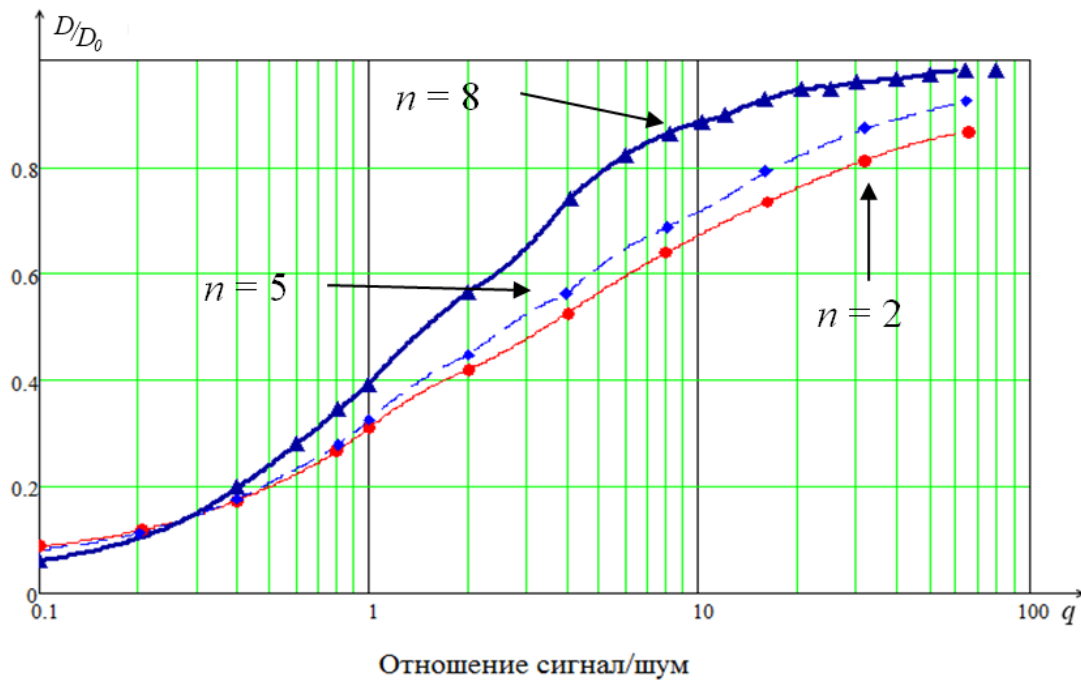


Рис. 5. Зависимость КНД от отношения с/ш при различной разрядности кода АЦП.

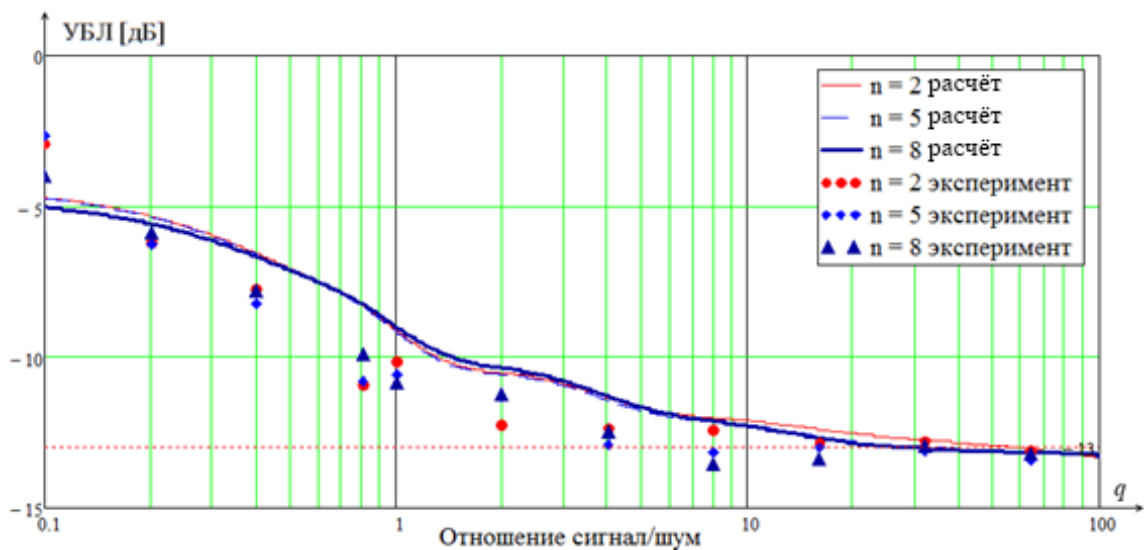


Рис. 6. Зависимость УБЛ от отношения с/ш при различной разрядности кода АЦП.

Глава 4. Возможности формирования требуемых антенных характеристик АФАР с ЦОС

В четвёртой главе диссертации проведено аналитическое исследование характеристик направленности ЦАФАР. Параметрами исследования являются: отношение сигнал/шум, форма сигнала и количество элементов полотна антенной решётки. Показаны возможности различных режимов работы АФАР с применением цифровой обработки сигнала на радиочастоте непосредственно в полотне

АР. Выявлены требования к элементной базе цифровой обработки сигнала для реализации необходимых характеристик направленности и режимов работы.

При использовании ЦОС в антенной решётке можно провести многократное копирование цифрового сигнала с последующим формированием с помощью N процессоров N независимо управляемых лучей. Каждый из этих лучей, может осуществлять сканирование в секторе, определяемом направленностью согласованного излучателя, и иметь суммарно-разностные (моноимпульсные) ДН, формируемую цифровым методом. Число формируемых лучей ограничивается быстродействием схемы ЦДО.

Как известно из теории ФАР, рабочая полоса антенной решётки $\Delta f / f_0$ зависит от полосы фазовращателей, излучателей, распределительной системы и сектора сканирования. В ЦАФАР частотные свойства могут быть улучшены. Расширение рабочей полосы частот в ЦАФАР может быть достигнуто применением либо диаграммообразующих схем на цифровых линиях задержки, либо матричных преобразований Фурье.

Цифровая линия задержки представляет собой быстродействующий сдвиговый регистр, в котором цифровой сигнал, поданный на вход, задерживается во времени на требуемое число тактов синхронизации.

В работе предложены матричные алгоритмы преобразования Фурье для ЦДО при широкополосной работе. При этом алгоритм работы схемы ЦДО сводится к операциям матричного перемножения. При матричной обработке необходимо иметь матрицу входных сигналов ss с числом столбцов M , равным числу элементов решётки. Числом строк этой матрицы N определяется полосой обрабатываемого сигнала. Сигнальная матрица преобразуется в спектральную SS путём умножения матрицы ss на матрицу время-частотного преобразования Фурье W слева.

$$SS = W \cdot ss, \quad (8)$$

Для определения ДН в цифровом виде транспонированную матрицу спектров SS необходимо домножить слева на диаграммообразующую матрицу коэффициентов Фурье $W_{ДН}$. Элементами матрицы $W_{ДН}$ являются фазовые множители, учитывающие разность хода волн между элементами решётки для каждой из частотных составляющих спектра сигнала. В полученной матрице FF столбцами

будут диаграммы направленности на частотных составляющих спектра входного сигнала.

$$FF = W_{ДН} \cdot SS^T, \quad (9)$$

В работе найдена форма алгоритм широкополосного ЦДО получена в матричной форме, позволяющего определить сигнал на выходе диаграммообразующей схемы:

$$ss' = W^* \cdot [W_{ДН} \cdot (W \cdot ss)^T]^T. \quad (10)$$

Особенности предложенного алгоритма ЦДО, позволяющего разделить спектральные составляющие сигнала, дают возможность применять нелинейные методы обработки без существенных потерь и нелинейных искажений, свойственных аналоговым методам. Это делает возможным, например, добиться эффекта ограниченной сверхнаправленности в виде сужения главного лепестка ДН и уменьшения УБЛ. Для этого можно модифицировать матричное ЦДО (10) следующим образом:

$$ss' = W^* \cdot FF'^T, \quad (11)$$

где FF' – матрица диаграммы направленности, каждый из элементов которой возведён в степень K и умножен на фазовый множитель, компенсирующий K -кратное увеличение фазы $\varphi_{i,j}$ элемента матрицы ДН ff :

$$FF' = \left\| ff^K \cdot \exp\{-jK\varphi_{i,j}\} \right\|_{i,j}. \quad (12)$$

В работе было проведено моделирование работы линейной ЦАФАР, составленной из 32 элементов при различных значениях K и шумах.

Из рис.7. видно, что при отношении мощности сигнала к СПМ шума порядка 10 можно получить ДН с шириной главного лепестка на 10% меньше, чем для синфазного равноамплитудного раскрыва. При меньших уровнях шумов и больших показателях степени можно добиться существенного увеличения направленных свойств ЦАФАР.

В работе показана возможность применения нелинейных операций ЦОС, дающих возможность существенно уменьшить число излучателей и увеличить шаг между ними без появления дифракционных максимумов ДН. Это связано с воз-

возможностью прямого перемножения ДН в синтезируемых эквивалентных апертурах решётки в цифровой форме.

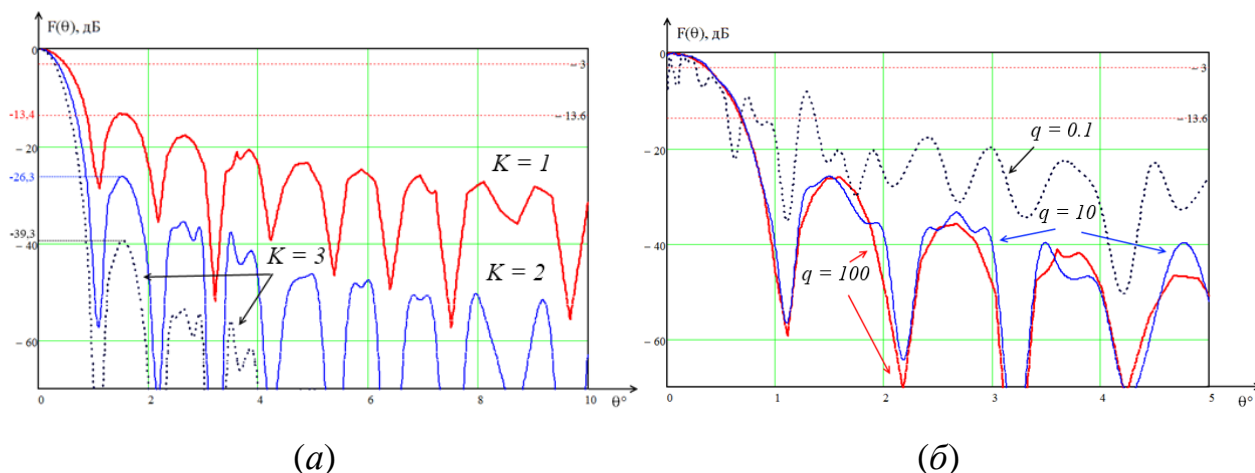


Рис.7. ДН ЦАФАР при нелинейной обработке а) – без шума; б) – с шумом.

На рис. 8.а. показан пример разреженной апертуры АР, составленной из двух перпендикулярных линеек излучателей. На рис. 8.б. приведены результаты моделирования ДН такой решётки, полученной аналоговым и цифровым методами.

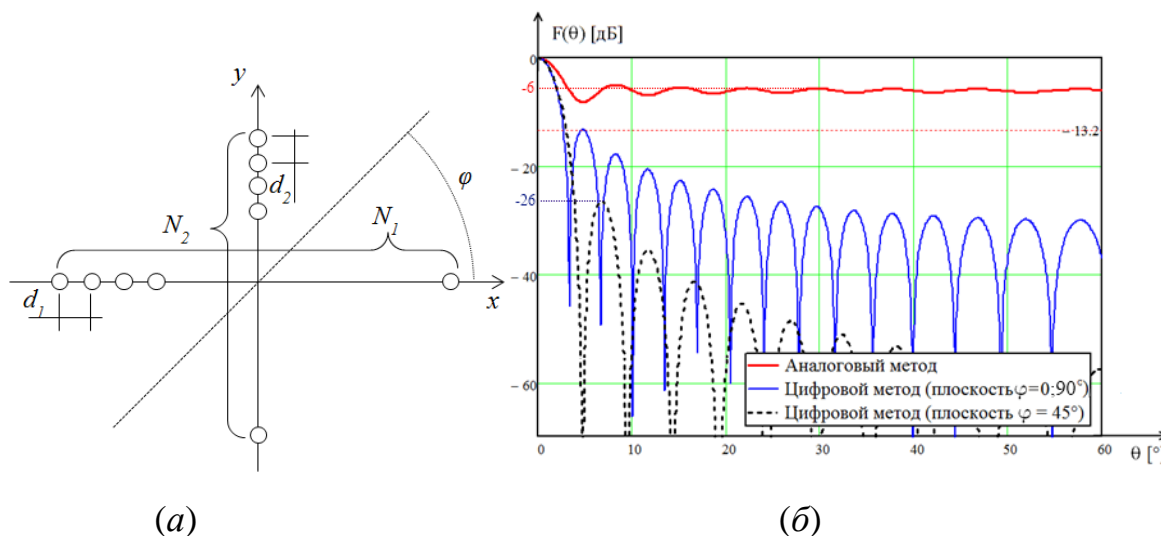


Рис. 8. К пояснению цифрового синтеза ДН незаполненной апертуры.

а) – апертура разреженной АР; б) – аналоговая и цифровая ДН.

Главным сдерживающим фактором применения цифровой обработки в АФАР является малое быстродействие устройств ЦОС. Известные методы субдискретизации и децимации дают возможность построения ЦАФАР на современной элементной базе. В работе выполнено моделирование ЦДО в режиме субдискретизации для оценки влияния джиттера на направленные свойства ЦАФАР. Моделирование показало возможность формирования ДН для АР с числом излу-

чателей порядка 1000 при 10-кратной субдискретизации и уровне шума джиттера не большем 10% от периода дискретизации.

Основные результаты и выводы

1. Определены изменения направленных свойств АФАР при оцифровке сигнала на несущей частоте: падение КНД, изменение УБЛ. Анализ произведён с учётом отношения мощности сигнала к мощности шума на входе каждого элемента ФАР, а также разрядности кода и частоты дискретизации аналого-цифровых преобразователей (АЦП).

2. Произведено численное имитационное моделирование характеристик направленности приёмных цифровых активных ФАР при наличии шума и дестабилизирующих факторов цифровой обработки сигнала.

3. Установлено, что современная цифровая элементная база позволяет строить приёмные активные антенные решётки в СВЧ диапазоне с существенным выигрышем по направленным свойствам, диапазонности, а также функциональным возможностям по сравнению с аналоговыми схемами построения ФАР.

4. Предложено использование субдискретизации при цифровой обработке сигнала в антенной решётке, позволяющее уменьшить на порядок частоту АЦП и требуемое быстродействие сигнальных процессоров по сравнению с частотой принимаемого сигнала для применения современной элементной базы в СВЧ диапазоне.

5. Предложен способ увеличения шага между излучателями в антенной решётке с цифровым диаграммообразованием, при котором не происходит ухудшения направленных свойств по сравнению с аналоговой ФАР.

6. Выявлены возможности существенного расширения рабочей полосы электрически сканирующих антенн с цифровой обработкой принимаемого сигнала, по сравнению с ФАР, в пределах рабочей полосы частот аналоговой приёмной части за счёт либо применения цифровых линий задержки, либо матричного алгоритма преобразования Фурье.

7. Правильность полученных результатов подтверждается совпадениями с ранее известными результатами в теории антенных решёток в частных случаях, а

также имитационным моделированием. Результаты работы доложены и обсуждены на 8 конференциях, опубликованы в 3 работах, рекомендованных ВАК, и использованы в выполняемых НИОКР «Фазотрон-МАИ».

По материалам диссертации опубликовано 11 печатных работ.

В изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

1. Бортовая ЦАР с обработкой сигнала на высокой частоте / П.А. Шмачилин // Информационно-измерительные и управляющие системы. №8, т.7, 2009г.
2. Построение цифровых антенных решёток для современных радиоэлектронных систем / П.А. Шмачилин // Антенны. Выпуск 3 (166), 2011г.
3. Характеристики направленности антенных решёток при цифровой обработке сигнала на несущей / П.А. Шмачилин // Антенны. Выпуск 3 (166), 2011г.

В других изданиях:

4. Кондратьева С.Г., Шмачилин П.А. Синтез ДН специальной формы для антенн базовых станций. Материалы 18 международной Крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» КрыМиКо'08, Украина, Севастополь, издательство «Вебер», 2008г.
5. Шмачилин П.А. Сверхширокополосные цифровые антенные решётки. Материалы международной конференции РТ-2009, Украина, Севастополь, РТ-2009, издательство «Вебер», с.137. 2009г.
6. Шмачилин П.А. Приёмная сверхширокополосная ЦАР. Международная Аэрокосмическая Школа, Украина, Алушта, 2009г.
7. Шмачилин П.А. Проблемы проектирования СВЧ ЦАР для радиолокационных задач. Материалы 19 международной Крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» КрыМиКо'09, Украина, Севастополь, издательство «Вебер», с.339. 2009г.
8. Шмачилин П.А. Фазовые ошибки цифровой обработки сигнала в ЦАР. Материалы международной конференции РТ-2010, Украина, Севастополь, издательство «Вебер», 2010г.

9. Шмачилин П.А. Характеристики направленности ЦАР СВЧ с прямым преобразованием сигнала. Материалы конференции «Информационные технологии и радиоэлектронные системы», Москва, МАИ, 2010г.
10. Шмачилин П.А. Фазовые ошибки цифровой обработки сигнала в ЦАР. Материалы 20 международной Крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» КрыМиКо'10, Украина, Севастополь, издательство «Вебер», 2010г.
11. Шмачилин П.А. Характеристики направленности ЦАФАР. Материалы конференции «Инновации в авиации и космонавтике-2011», Москва, МАИ, 2011г.