

ЦИФРОВЫЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ СИНТЕЗАТОРЫ ДЛЯ ФАЗИРОВАННЫХ АНТЕННЫХ РЕШЕТОК

С.Дингес, к.т.н., Н.Егоров, к.т.н., В.Кочемасов, к.т.н., МТУСИ

Этой публикацией мы открываем серию статей, посвященных цифровым вычислительным синтезаторам (или схемам прямого цифрового синтеза). Цифровые вычислительные синтезаторы (ЦВС, Direct Digital Synthesizer, DDS) позволяют цифровыми методами формировать сигналы нужной формы и частоты, причем используя единственный генератор опорной частоты. Такие устройства все чаще используются, в частности, в современных фазированных антенных решетках (ФАР). Поэтому серию публикаций мы начнем с обзора решений именно в области ФАР на основе ЦВС, в их исторической ретроспективе.

ФАР С ЦИФРОВЫМИ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫМИ СИНТЕЗАТОРАМИ

В последние годы за рубежом, прежде всего в США, активно ведутся исследования в области ФАР с ЦВС [1, 2]. Ряд материалов на сайтах организаций, ведущих военные разработки в США, появился еще в начале века. Речь шла о системе AMRFS (Advanced Multifunction RF System), в системе ФАР которой используется множество ЦВС. Хотя часть информации по данной тематике, вероятно, является закрытой, некоторые публикации все же периодически появляются в печати и в Интернете.

Так, в конце 2009 года в докладе Управления научных исследований ВМФ США (ONR) [2] была изложена концепция построения многофункциональных радаров для надводных боевых кораблей ВМФ США (рис.1). В частности, предусматривалось оснащение судов многофункциональными радарными S- и X-диапазона, основные задачи которых сводятся к контролю окружающего пространства и решению задач боевого управления. В функции радара X-диапазона входит наблюдение как за воздушным пространством (управление воздушными силами и контроль воздушного пространства), так и за поверхностью (обнаружение и сопровождение надводных целей и целей на

"проходе", поиск низколетящих целей, обнаружение перископов и сопровождение ракет). Основная задача радара S-диапазона состоит в обнаружении и селекции различных целей, прежде всего ракет противника, на больших расстояниях. В докладе рассматривалась программа ONR создания недорогой унифицированной архитектуры радаров ACRA (Affordable Common Radar Architecture) (2009–2013 год). Программа предусматривала разработку радаров как с неподвижными, так и с поворотными ФАР. Причем приемные ФАР могут масштабироваться по числу антенных элементов от 48×48 до 96×96.

В истории эволюции систем ФАР (рис.2) [1] наиболее простой из антенных решеток была пассивная ФАР с аналоговым формирователем луча. На следующем этапе развития широкое распространение получили активные ФАР с аналоговым формирователем луча. В блоке генерирования сигналов, формирующем СВЧ-колебания с необходимыми параметрами, стали использовать ЦВС. В этих двух первых классах ФАР управление фазами формируемых сигналов происходит в аналоговой форме.

Традиционные системы с ФАР производились главным образом на основе аналоговых РЧ-компонентов, дорогостоящих и обычно

работающих только в узкой полосе частот. Применение в РЧ-блоках современных цифровых технологий предоставляет разработчикам дополнительные возможности. Примером служат цифровые вычислительные синтезаторы, которые можно найти практически во всех конструкциях новых систем с ФАР. Так, на рис.2 приведена обобщенная структура активных ФАР с цифровым формированием луча. Такой цифровой радар способен одновременно формировать несколько лучей и отслеживать множество целей в различных направлениях. Каждый активный элемент такой ФАР (радиочастотный блок) содержит передатчик (Tx), выполненный на цифровых вычислительных синтезаторах, и приемник (Rx) с аналого-цифровым преобразователем (АЦП). Кроме того, в систему входит цифровой формирователь луча и средства управления параметрами сигналов вместе с тактированием и синхронизацией. Довольно серьезная проблема подобных ФАР – обеспечение синхронизации между несколькими приемниками или несколькими параллельно излучающими элементами решетки.

Радиочастотный блок формирования сигнала с ЦВС в самом общем виде показан на рис.3. В цифровых вычислительных синтезаторах, иногда называемых прямыми цифровыми синтезаторами, периодически, с заданной частотой дискретизации, цифровыми методами формируются отсчеты

(коды) амплитуды выходного сигнала. Текущее значение фазы формируемого сигнала вычисляется в накопителе фазы. Значения амплитуды сигнала, соответствующие текущей фазе, могут вычисляться или выбираться из соответствующего запоминающего устройства (ЗУ) в преобразователе "фаза-синус". Полученный код амплитуды, соответствующий текущей фазе, подается в ЦАП, где цифровой код амплитуды преобразуется в напряжение. Сигнал фильтруется, затем выходная мощность повышается усилителем мощности (УМ), и далее сигнал подается на антенную систему через ключ прием-передача (Rx/Tx) или дуплексер.

В ряде случаев в элементах активных ФАР в качестве формирователя сигналов целесообразно совместно использовать ЦВС и систему ФАПЧ, преобразующую сигналы вверх по частоте. При этом

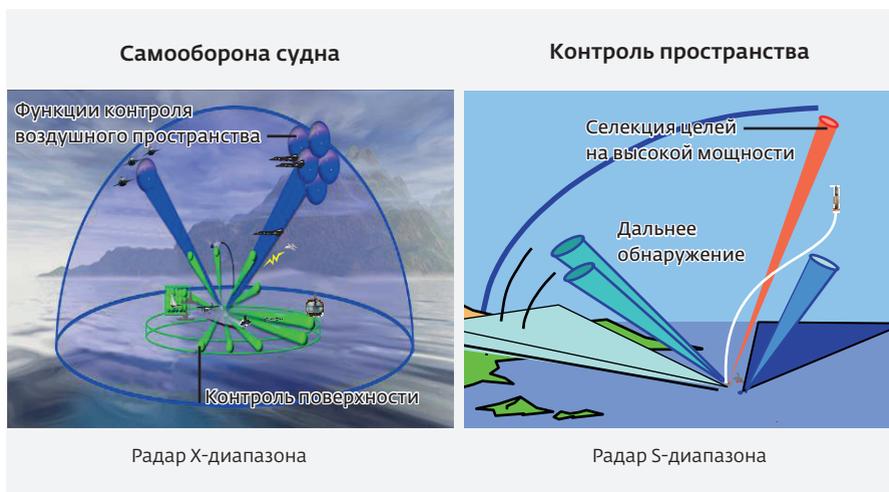


Рис.1. Функции радаров надводных кораблей

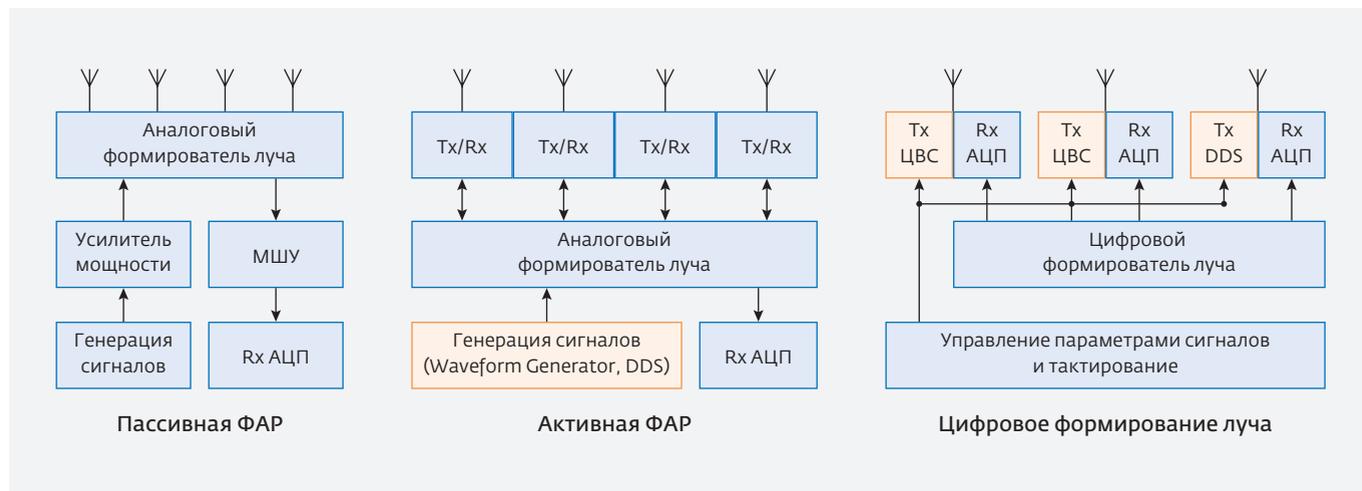


Рис.2. Эволюция фазированных антенных решеток

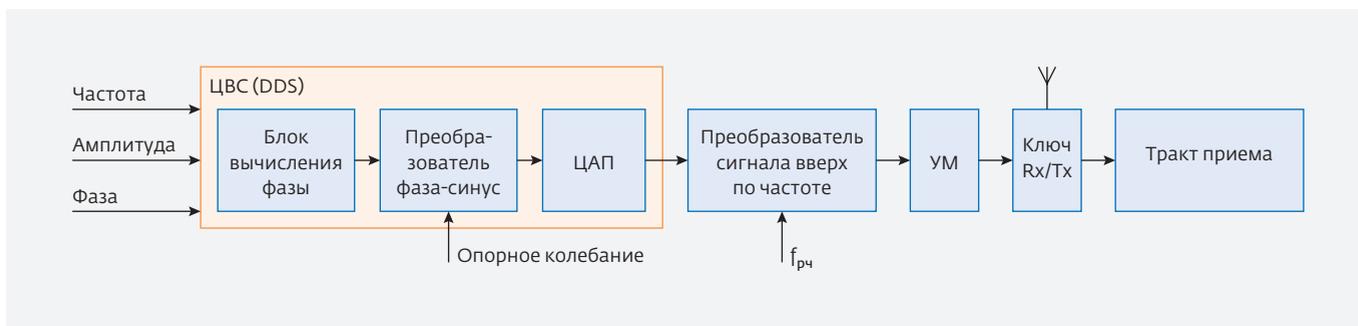


Рис.3. Обобщенная структура радиочастотного блока с использованием ЦВС

выходной сигнал ЦВС служит входным эталонным сигналом для системы ФАПЧ. Этот метод позволяет получить высокое разрешение по частоте и фазе, а также достаточно высокую рабочую частоту ФАР. Такая схема рассматривается, в частности, в работе [3], где предлагается многоканальный модуль для ФАР С-диапазона, а также в [4].

Активные ФАР с набором ЦВС позволяют реализовать ряд важных функций и преимуществ систем радиолокации, управления и связи, именно:

- формирование сигналов различных типов с широкими диапазонами изменения параметров, в том числе сигналов с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ, Linear chirp);
- высокоточное управление частотой и фазой сигналов, а также временными задержками;
- быстрое изменение режимов работы, типов сигналов, рабочих частот и других параметров;
- многофункциональный режим системы ФАР в целом, когда различные группы активных элементов выполняют индивидуальные задачи;
- повышенная надежность и живучесть системы, поскольку при выходе из строя одного или нескольких элементарных РЧ-блоков с ЦВС система в целом остается работоспособной, тогда как при выходе из строя единственного формирователя сигналов ФАР она фактически перестает функционировать.

О динамике исследований по тематике ФАР с ЦВС можно также судить по большому количеству патентов и разработок цифровых радаров с ФАР для американской армии. Характерный пример – американский патент №7345629 В2 от 2008 года, где детально рассматривается широкополосная активная ФАР, содержащая множество ЦВС. Предложенная система включает блок High Fidelity Method (HFM) modulation/beam control processor – специальный процессор, управляющий параметрами модуляции и луча с помощью высокоточных методов. Процессор поддерживает алгоритмы

динамического изменения параметров модуляции и формируемого луча. При этом не нужны фазовращатели, высокоточные линии задержки, аттенюаторы с цифровым управлением и другие компоненты, которые традиционно используются для подстройки фазы и амплитуды выходного сигнала. Причем возможно одновременно формировать несколько лучей. Метод и средства решения одной из наиболее серьезных проблем реализации высококачественной системы – синхронизации сигналов нескольких ЦВС в системе ФАР – рассматриваются в другом американском патенте, №7624296 В2.

Еще один пример – это разработки цифровых радаров с ФАР для американской армии. Еще в 2009 году был описан прототип радара с цифровой 16-элементной ФАР [5]. Для управления ФАР использована иерархическая структура с двумя уровнями, что позволило значительно упростить всю систему и уменьшить ее размеры (рис.4). Главный блок управления контролирует четыре четырехканальных модуля. Каждый из них, в свою очередь, управляет четырьмя трансиверными модулями ФАР. Схема управления каждого модуля построена на основе ПЛИС Spartan компании Xilinx. В прототипе радара использовались индивидуально программируемые ЦВС. Высокочастотный сигнал на несущей частоте формируется в блоке трансиверов (использовались стандартные ИС SMI7335 трансиверов для WiMAX с MIMO 2x2 компании Sierra Monolithics) и через блок усилителей поступает в антенный тракт.

РАДАРЫ С ФАР И ЦВС

Радарные системы с ФАР обладают уникальной возможностью практически мгновенно перестраивать диаграмму направленности антенны исключительно электронными способами. Кроме того, обеспечено точное оперативное управление формой диаграммы направленности, что полезно

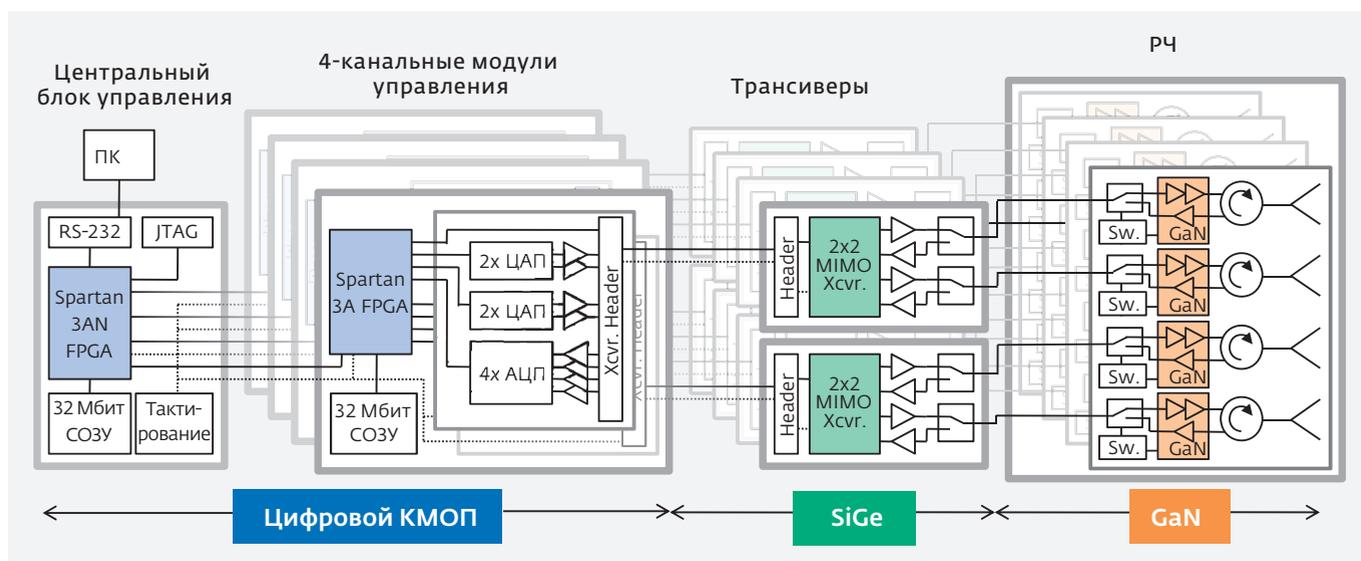


Рис.4. Структура радара с 16-элементной ФАР

как для обнаружения объектов, так и для подавления стороннего излучения. Поэтому развитие и применение подобных систем продолжается уже не одно десятилетие. И ЦВС открывают новые возможности для совершенствования таких радаров.

Например, в 2009 году была представлена радарная система SAPHIRE с ФАР для получения трехмерного изображения внутри зданий [6]. Ее антенная система состоит из четырех передающих и восьми приемных элементов. Для передачи сигнала применяется один из четырех элементов. Отраженный сигнал принимается с помощью восьми антенных элементов одновременно. В системе используется ЛЧМ-сигнал с полосой 350 МГц и центральной частотой 2,355 ГГц. Для генерации ЛЧМ-сигнала используется ЦВС.

Компания ThalesRaytheonSystems выпустила усовершенствованный наземный подвижный радар AN/MPQ-64F1 с ФАР (рис.5) для X-диапазона, в формирователе сигналов которого также применен синтезатор ЦВС. Компания SELEX S&AS разработала компактный радар Vixen 500E с ФАР для военных самолетов. В радаре применяется электронное управление лучом в X-диапазоне. Поддерживается несколько режимов обнаружения объектов в воздухе и на земле на основе технологии ЦВС для генерации импульсных сигналов с варьируемыми параметрами. Область сканирования составляет ±60°. Модель отличается небольшим весом и малыми размерами. В системе управления использованы обычные процессоры коммерческого применения.

В ФАР-радаре беспилотного летательного аппарата, разработанного по заказу Центра дистанционного мониторинга ледникового щита CRE SIS (The Center for the Remote Sensing of Ice Sheets), применен цифровой многоканальный генератор (рис.6) [7]. Генератор выполнен на основе ЦВС (Analog Devices AD9910) и ПЛИС.

Показательным примером использования активной ФАР с ЦВС в системах связи можно считать базовую станцию системы подвижной связи TD-LTE [11]. Антенна ФАР этой станции состоит из двух параллельных решеток с 8 активными элементами в каждой, причем в качестве гетеродина опорной частоты и фазовращателя применяется ЦВС. В каждой решетке используются два четырехканальных



Рис.5. Усовершенствованный радар компании ThalesRaytheonSystems

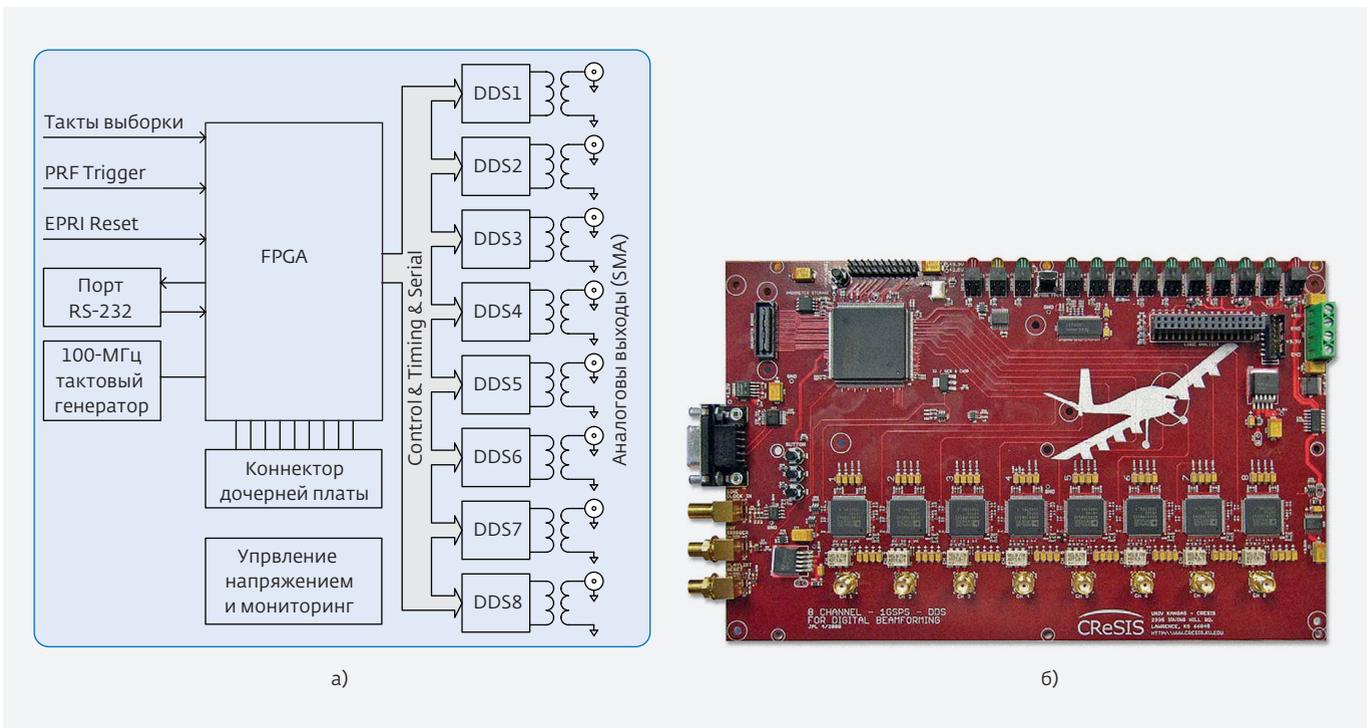


Рис.6. Многоканальный генератор на основе ЦВС AD9910: а) структура, б) печатная плата

ЦВС AD9959 компании Analog Devices с разрешением по частоте 32 разряда и по фазе - 14 разрядов.

РАСПРЕДЕЛЕННЫЕ ЦИФРОВЫЕ ФАР НА ПОДВИЖНЫХ И СТАЦИОНАРНЫХ ПЛАТФОРМАХ

В ряде последних работ получила развитие концепция создания пространственно-распределенных ФАР с использованием ЦВС. Например, в случае стационарных систем активные приемопередающие модули могут быть распределены по поверхности зданий, обшивке летательных аппаратов или кораблей, образуя ФАР большой площади.

Цифровая ФАР может быть создана из группы мобильных объектов, меняющих взаимное положение друг относительно друга, например, на базе звена беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) (рис.7). В этом случае информация передается на базовую станцию от распределенной ФАР, сформированной группой БПЛА. Естественно, предполагается централизованное управление всей системой ФАР [8]. Есть проекты распределенных систем ФАР с совместным формированием луча (Collaborative Beamforming) на основе других подвижных объектов (рис.8) [9]. В этом случае распределенная ФАР создается с помощью специальных средств индивидуальной радиосвязи PRR (Personal Role Radio) военнослужащих в районе боевых действий

и специальных операций, что позволяет увеличить дальность радиосвязи. Концепция распределенных ФАР на базе различных объектов позволяет создавать динамические радиосистемы, обладающие высокой живучестью и позволяющие обеспечить в некоторых системах показатели выше стационарных ФАР.

Одна из основных областей применения распределенных стационарных ФАР – радары для военных кораблей, прежде всего, построенных по технологии "стелс". Например, такой подход предложен для оснащения эсминца DDG1000 класса Zumwalt,

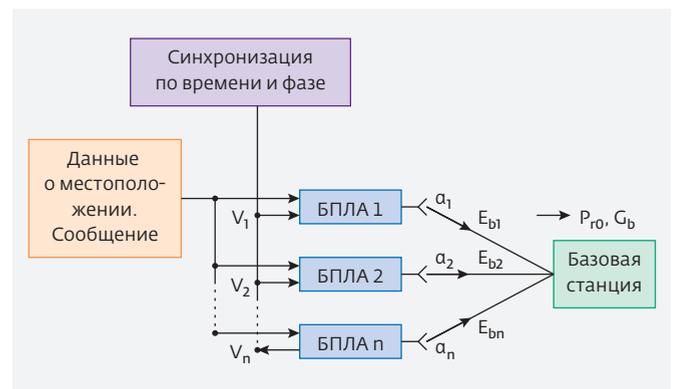


Рис.7. Принцип совместного формирования луча группой БПЛА

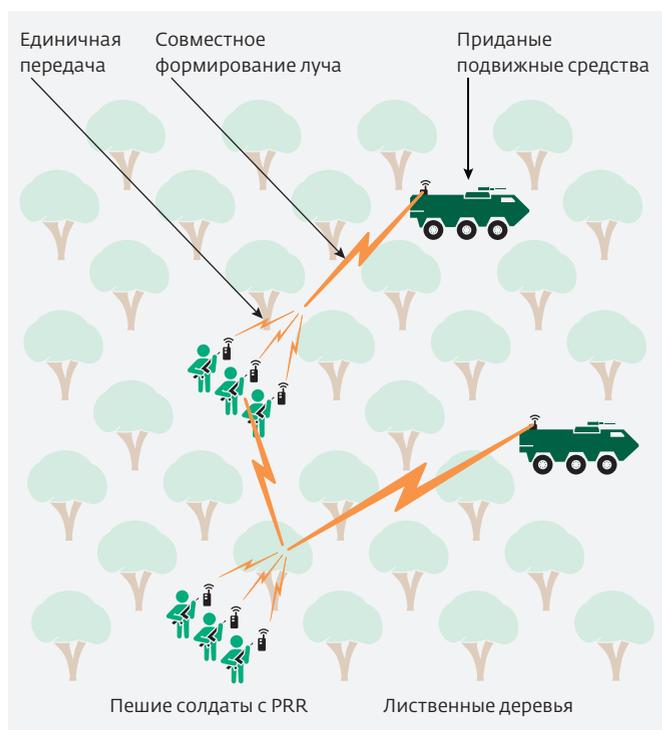


Рис.8. Типичное развертывание боевой тактической группы, использующей специальные индивидуальные радиосредства PRR с совместным формированием луча

на борту которого радар S- и X-диапазонов расположен в верхней части рубки корабля (рис.9) [10]. Элементы ФАР не сосредоточены в одном месте, а распределены практически по всему пространству корабля. Поэтому существенно увеличивается площадь антенны и улучшается разрешение радара, а отдельные элементы системы уже не выступают из корпуса корабля и не образуют дополнительных отражающих поверхностей (технология "стелс").

Важная особенность распределенной структуры - отдельные приемопередающие элементы



Рис.9. Эсминец DDG1000 класса Zumwalt

ФАР могут быть связаны со средствами управления и цифрового формирования луча беспроводным способом. На приемопередающие элементы ФАР, в которых используются ЦВС, от центрального управляющего устройства и цифрового формирователя лучей поступает информация управления, данные о формировании сигналов, сигналы опорной и тактовой частоты, информация о фазовой синхронизации.

Ключевыми задачами, которые предполагается возложить на распределенную цифровую систему ФАР военного корабля, станут раннее предупреждение о ракетном нападении и отслеживание баллистических ракет противника. Ожидается, что использование в радарх с распределенными ФАР цифровых вычислительных синтезаторов позволит повысить эффективность решения этих и подобных задач.

* * *

В заключение отметим, что для новых радиотехнических систем ФАР с ЦВС наиболее перспективными являются решения на базе специализированных интегральных схем. Подобные схемы позволяют обеспечить многофункциональный режим с формированием гармонических, квадратурных и ЛЧМ-сигналов,

а также оперативное изменение режимов работы и параметров сигналов в компактной конструкции с относительно малым энергопотреблением.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Wu Manqing**. Digital array radar: Technology and trends. – 2011 IEEE CIE International Conference on Radar, 2011, vol.1, p.1-4.
2. **Sexton R.** R&D in navy phased array radar. – Second national symposium on multi-function phased array technology innovation and development, November 18, 2009.
3. **Yinghao Zhang, Wen Wu, Guo Yang, Jianzhong Zhao**. DDS-PLL phased source for beam control active phased array. – Nanjing University of Science and Technology, Nanjing, China. 2008.
4. **Avitabile G., Cannone F., Vania A.** Phase shifter based on DDS-driven offset-PLL. Electronics Letters 7th December 2006, vol.42, no.25.
5. **Chappell W.** Next generation antenna arrays. – School of electrical & computer engineering purdue university.
6. **Smits F.M.A., De Wit J.J.M., Van Rossum W.L., Maas A.P.M., Bolt R.J., Lievers C.M.** 3D mapping of buildings with SAPPHIRE. 6th EMRS DTC Technical Conference. – Edinburgh 2009.
7. **Ledford J.** Development of an eight channel waveform generator for beam-forming applications. – M.S.Thesis electrical engineering & computer science. University of Kansas, p.110.
8. **Kocaman I.** Distributed beamforming in a swarm UAV Network. – Master of Science in Electronic Warfare Systems Engineering. Naval Postgraduate School. March 2008, p.91, www.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a479952.pdf.
9. **Chun Man Chan.** Distributed beamforming in man portable communication networks. – Master's Thesis, Naval Postgraduate School, Monterey, California. December 2007, p.117, www.dtic.mil/get-tr-doc/pdf?AD=ADA475782.
10. DDG 1000 zumwalt class – multimission destroyer, United States of America. – www.naval-technology.com/projects/dd21.
11. **Linsheng Li, Wei Hong, Peng Chen.** Design and implementation of an active antenna array for TD-LTE system based on DDS phase shifter. – 2013 Asia-Pacific Microwave Conference Proceedings, p.672-674.

INTEL "БРОДИТ" ПО ДИАПАЗОНУ МИЛЛИМЕТРОВЫХ ДЛИН ВОЛН В ПОИСКЕ МЕСТА ДЛЯ СЕТЕЙ 5G

Поле удачного освоения 60-ГГц диапазона в беспроводных локальных сетях специалисты компании Intel рассматривают возможность применения СВЧ-устройств в беспроводных сотовых системах следующего поколения. Группа исследователей под руководством старшего управляющего по разработке стандартов СВЧ мобильных и беспроводных систем Али Садри изучает возможность реализации 28- и 39-ГГц каналов доступа мобильных устройств, способных обеспечить пропускную способность в 1 Гбит/с при передаче информации на расстояние до 200 м. К 2016–2017 году планируется разработать новые микросхемы контроллера доступа к среде и физического уровня.

Intel входит в число компаний, считающих, что 5G-сотовым системам для обеспечения связи непрерывно растущего числа абонентов, пользующихся все большим объемом данных, необходимо работать в диапазоне миллиметровых длин волн. В конце 2013 года Европейская комиссия открыла исследовательский проект суммой в 1,8 млрд. долл. на освоение 5G-систем, в котором предусмотрено изучение устройств миллиметрового диапазона. Форумы, проводимые в азиатских странах, также обсуждают эти вопросы. Увеличение рабочих частот позволит расширить диапазон частот и увеличить пропускную способность, правда на более коротких расстояниях. Но переход на более высокие частоты потребует решения технических и нормативных проблем. Сейчас Intel работает с двумя европейскими консорциумами и сотрудничает с Samsung и другими компаниями

по проектам освоения 5G-систем СВЧ-диапазона. Изучаются и работы, проводимые в Китае и Корее в области 5G-систем.

Сегодня уже ведется активное обсуждение достоинств и недостатков использования 28- и 39-ГГц каналов связи мобильных устройств в 5G-сетях. Samsung провела большой объем работ по освоению 28-ГГц диапазона, но, по мнению специалистов Intel, с точки зрения принятия нормативных актов 39-ГГц диапазон более привлекателен, поскольку спутниковая связь уже использует часть 28-ГГц диапазона и тем самым задает правила его использования. Если рассматривать технические возможности реализации приборов этих двух диапазонов, то работа на 39 ГГц позволит применять антенны меньших размеров, чем 28-ГГц приборы. Поскольку площадь, занимаемая антенной, составляет ~10 см², а работа на частоте 39 ГГц позволяет использовать антенны меньших, чем на 28 ГГц, размеров, на выделенной площади можно разместить больше антенн. Это весьма важно для ФАР с формируемой диаграммой направленности, которые требуются в сотовых системах. Кроме того, указывается, что работа на частоте 39 ГГц, по сравнению с работой на 60 ГГц, обеспечивает улучшение интенсивности сигнала на 3–5 дБ.

Компания планирует и в дальнейшем исследовать свойства СВЧ-приборов этих двух диапазонов, а также изучить такие проблемы, как роуминг на высоких частотах, связь систем, работающих в традиционных и миллиметровых диапазонах, обеспечение связи в городских районах с высотными зданиями, блокирующими высокочастотные сигналы.

