

УДК 621.396.61

Е.В. Васильев

РАДИОПЕРЕДАТЧИКИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ MIMO КАНАЛА СВЯЗИ С БЕСПИЛОТНЫМ ЛЕТАТЕЛЬНЫМ АППАРАТОМ

Представлены результаты разработки и испытаний трех вариантов радиопередатчиков диапазона 2,4 ГГц, предназначенных для экспериментальной работы по измерению коэффициентов канальной матрицы MIMO радиоканала передачи данных от беспилотного летательного аппарата на наземный пункт управления.

Ключевые слова: беспилотные аппараты, MIMO системы радиосвязи, цифровые радиопередатчики, синтезатор частоты прямого цифрового синтеза, синтезатор частоты косвенного синтеза, КПД передатчика, энергетическая эффективность, экономичность передатчика, алгоритм работы микроконтроллера.

Введение. Современные системы беспроводных коммуникаций, применяемые для обмена данными с беспилотными летательными аппаратами (БПЛА) гражданского назначения, можно разделить на низкоскоростные, применяемые для передачи телеметрической информации с борта БПЛА на пункт управления и получения команд, управляющих движением, и высокоскоростные, предназначенные для передачи полезной информации, собираемой БПЛА в соответствии с целью его полета, например изображения с видеокамеры высокого разрешения или информации от других датчиков и приборов. В обоих случаях важно добиваться повышения скорости передачи информации и снижения количества ошибок при использовании отведенной полосы частот, т.е. улучшения пропускной способности радиоканала.

Пропускная способность реального канала передачи данных зависит от наличия шумов, помех и искажений сигнала различной природы, относящихся как к самому каналу распространения радиоволн, так и к работе радиопередатчика, радиоприемника и антенно-фидерных устройств. Одним из наиболее существенных механизмов, ухудшающих пропускную способность радиоканала, является интерференция радиосигналов, приходящих к приемной антенне различными путями, образующимися из-за наличия большого количества отражателей радиоволн, находящихся в пространстве между передающей и приемной антеннами. Это явление принято называть многолучевостью распространения (Multipath). Многолучевость может вызвать глубокие зами-

рания сигнала, приводящие к нарушению связи, а также к межсимвольной интерференции, которая является следствием сложения на приемной антенне нескольких копий передаваемого сигнала, имеющих различные задержки [1]. В случае с каналом радиосвязи с БПЛА наиболее существенными отражателями, вызывающими многолучевость, являются элементы рельефа земной поверхности, стены окружающих зданий, мачты и опоры ЛЭП, деревья, столбы и т.п.

С целью преодоления влияния многолучевости распространения радиоволн на качество передачи информации разработана технология MIMO (Multiple Input Multiple Output), которая состоит в одновременном излучении передаваемого сигнала несколькими антеннами на передающей стороне и одновременном его приеме на несколько приемных антенн с последующей математической обработкой в приемнике. Антенны в пункте передачи (как и в пункте приема) должны быть пространственно разнесены настолько, чтобы по возможности снизить взаимную корреляцию принимаемых радиосигналов для каждой пары передающих и для каждой пары приемных антенн [2].

При проектировании MIMO систем и в ходе решения задач исследовательского характера, связанных с их разработкой, необходимо учитывать канальную матрицу, образующуюся из комплексных коэффициентов передачи по каналу распространения радиоволн между всеми возможными парами передающих и приемных антенн. От правильности оценивания канальной матрицы во многом зависит эффективность

функционирования алгоритмов формирования и обработки сигналов в ММО системе, т.е. в конечном счете – пропускная способность такой системы передачи данных [2].

Из приведенных соображений ясно, что задача экспериментального измерения коэффициентов канальной матрицы ММО радиоканала, связывающего БПЛА с наземным пунктом управления, является весьма актуальной. В доступной литературе не удалось найти достаточно полных сведений, характеризующих поведение коэффициентов канальной матрицы для различных условий движения БПЛА. Вследствие этого перед группой исследователей РГРТУ была поставлена задача измерения комплексных коэффициентов канальной матрицы ММО системы передачи данных от БПЛА к наземному пункту управления в реальном времени при движении БПЛА. Решение этой задачи связано с разработкой и созданием радиопередающей аппаратуры нелегализуемого ISM диапазона (Industrial, Science and Medical – диапазон для использования в промышленности, науке и медицине [3]), устанавливаемой на БПЛА, а также приемной аппаратуры наземного базирования, способной регистрировать в реальном времени отсчеты принимаемого сигнала в комплексной форме, т.е. с применением его квадратурной обработки.

Цель работы – разработка нескольких отличающихся по сложности схемотехнической и программной составляющей вариантов передающей части радиотракта БПЛА, анализ их возможностей, а также практическая реализация и применение разработанных передатчиков в экспериментальной работе по измерению коэффициентов канальной матрицы ММО системы передачи данных от БПЛА в диапазоне 2,4 ГГц.

Краткие теоретические сведения. В диапазоне частот выше 1 ГГц в настоящее время используют несколько отличающихся по сложности вариантов структурных схем радиопередатчиков. Выбор в пользу одной из них для реализации в качестве экспериментального бортового радиопередатчика БПЛА может быть сделан с учетом следующих основных показателей, которые будут перечислены в порядке их значимости:

- вид модуляции и скорость передачи данных;
- требования к качеству радиосигнала, а именно к стабильности несущей частоты и уровню паразитных спектральных составляющих в выходном сигнале;
- энергетическая эффективность (экономичность) радиопередатчика в целом;
- массогабаритные показатели.

Наиболее простые передатчики могут быть реализованы по структурным схемам с прямой модуляцией и прямой квадратурной модуляцией. В таких передатчиках генератор, управляемый напряжением (ГУН), вырабатывает колебания с рабочей частотой передатчика, а модуляция происходит путем воздействия на сам ГУН или его выходной сигнал. В передатчиках с прямой модуляцией (рисунок 1, а) реализуются виды модуляции с постоянной огибающей, например частотная манипуляция (N-FSK), а в передатчиках с прямой квадратурной модуляцией (рисунок 1, б) возможно формирование любых узкополосных амплитудно-фазовых видов модуляции, например многопозиционной квадратурной амплитудной модуляции (N-QAM).

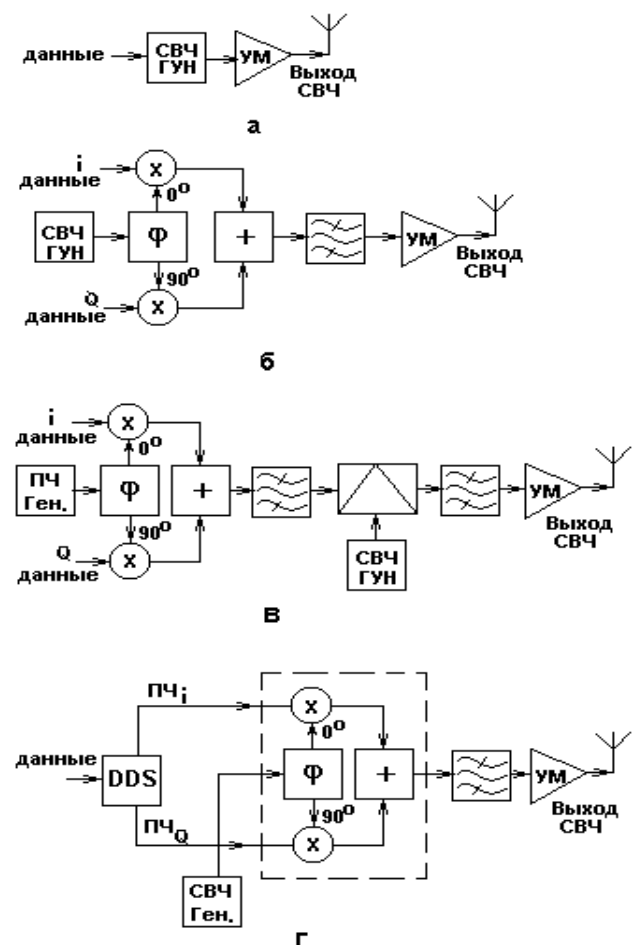


Рисунок 1 – Радиопередатчики с прямой модуляцией (а), с прямой квадратурной модуляцией (б), с непрямой модуляцией (супергетеродин) (в) и с прямым цифровым синтезатором частоты (г)

Схемы с прямой модуляцией и прямой квадратурной модуляцией получаются предельно простыми, и это является их основным достоинством, но при повышенных требованиях к качеству сигнала передатчика или его экономичности могут оказаться существенными следующие их недостатки:

- нестабильность несущей частоты и искажения модуляции, связанные с паразитным влиянием усилителя мощности (УМ на рисунке 1) на ГУН;

- снижение экономичности передатчика в схеме с прямой квадратурной модуляцией вследствие большого тока потребления выпускаемых промышленностью интегральных СВЧ квадратурных модуляторов [4].

Для преодоления указанных недостатков применяются на практике [5] следующие варианты схемы с прямой модуляцией:

- схема с прямой модуляцией с умножением частоты ГУН;

- схема с прямой квадратурной модуляцией со сдвигом частоты ГУН в преобразователе частоты;

- схема с прямой или прямой квадратурной модуляцией с заменой ГУН интегральным СВЧ синтезатором частоты.

Непрямая модуляция (модуляция с преобразованием частоты вверх, рисунок 1, в) является наиболее популярной, так как позволяет реализовать все преимущества супергетеродинных передатчиков, в частности спектральную чистоту сигнала и низкое энергопотребление квадратурного модулятора, работающего на относительно низкой промежуточной частоте (ПЧ). Легко предотвратить затягивание частот гетеродина и просачивание его сигнала в антенну. Недостаток – трудность изготовления фильтров, а также необходимость генерирования двух частот генераторов, что ухудшает массогабаритные показатели передатчика и усложняет его настройку.

Одна из наиболее совершенных схем передатчиков, позволяющая реализовать многие преимущества цифровых способов формирования радиосигналов, – схема с прямым цифровым синтезатором частоты (Direct Digital Synthesizer – DDS [6]), имеющим квадратурные выходы радиосигнала на ПЧ, соединенным с квадратурным цифровым преобразователем частоты вверх, на рабочие частоты СВЧ диапазона [7]. В качестве СВЧ гетеродина для квадратурного преобразователя частоты может быть применен интегральный синтезатор частоты на основе петли ФАПЧ; такой вариант структурной схемы передатчика показан на рисунке 1, г. Такая схема может быть применена в случае необходимости получения сложных видов или высоких скоростей модуляции и является в этом плане наиболее универсальной и уместной для использования в экспериментальных исследованиях. Её существенные недостатки – сложность в изготовлении и относительно высокая стоимость, а главное – повышенное потребление энергии по сравнению с

рассмотренными выше схемами передатчиков.

Следующий раздел настоящей работы посвящен описанию практической реализации и результатов использования различных вариантов бортового радиопередатчика БПЛА, предназначенного для измерения коэффициентов канальной матрицы ММО радиолинии между БПЛА и наземным пунктом управления.

Техника и результаты эксперимента. Для выполнения предварительных экспериментальных исследований с использованием сверхмалого БПЛА был разработан и реализован радиопередатчик с прямой модуляцией (рисунок 1, а) на основе высокостабильного интегрального ГУН ROS-2500-1419+ [8] фирмы Mini Circuits. Основными преимуществами данного ГУН являются достаточный уровень выходной мощности +7 дБм (при максимальном разрешенном уровне мощности в ISM диапазонах +10 дБм), низкое напряжение питания (+5 В), габариты 12x12x5 мм и вес 1 грамм. Важно отметить, что при таких габаритах и массе данное устройство представляет собой полностью законченный радиотракт маломощного передатчика диапазона 2,4 ГГц. Температурная стабильность данного ГУН составляет 38 ppm при изменении температуры на 1 градус; показано, что такая стабильность достаточна для сохранения когерентности при поочередном переключении двух передающих антенн и общей длительности сеанса измерения около 1 секунды.

Таким образом, в состав разработанного передатчика входят (рисунок 2, а): G1 – интегральный ГУН ROS-2500-1419+; D1 – микроконтроллер ATmega48, выполняющий функцию модуляции и переключения антенн; D2 – интегральный ЦАП с последовательным интерфейсом DAC8512, вырабатывающий управляющее напряжение для ГУН; Z1 – пассивный петлевой фильтр; S1 – интегральный миниатюрный СВЧ переключатель MASWSS0115 фирмы M/A-Com Inc, выполняющий функцию антенного коммутатора, интегральный стабилизатор напряжения IL78L05 (на рисунке не показан). Устройство собрано на двусторонней печатной плате из фольгированного стеклотекстолита размером 37x115 мм (с учетом места, занимаемого группами пустых контактных площадок для возможного изменения или наращивания схемы в процессе экспериментальной работы). Общий ток потребления передатчика составляет 55 мА от источника питания +7,5 ... +9 В.

Основным недостатком первого варианта бортового радиопередатчика, ограничивающего область его использования только предварительными экспериментами, является низкая ста-

бильность несущей частоты. Для устранения этого недостатка необходим переход от параметрической стабилизации частоты к кварцевой стабилизации, что может быть выполнено путем включения упомянутого выше ГУН в систему фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ) с кварцевым опорным генератором. Интегральные микросхемы синтезаторов частоты такого типа и интегральные микротрансиверы на их основе широко выпускаются современной промышленностью, см., например, [9, 10]. Однако с целью сокращения количества корпусов интегральных микросхем было принято решение использовать интегральный синтезатор частоты со встроенной в кристалл схемой ГУН. В качестве такой микросхемы был выбран сверхминиатюрный синтезатор частоты с ФАПЧ ADF4360-1, построенный по схеме с двухмодульным предварительным делителем и поглощающим счетчиком [11].

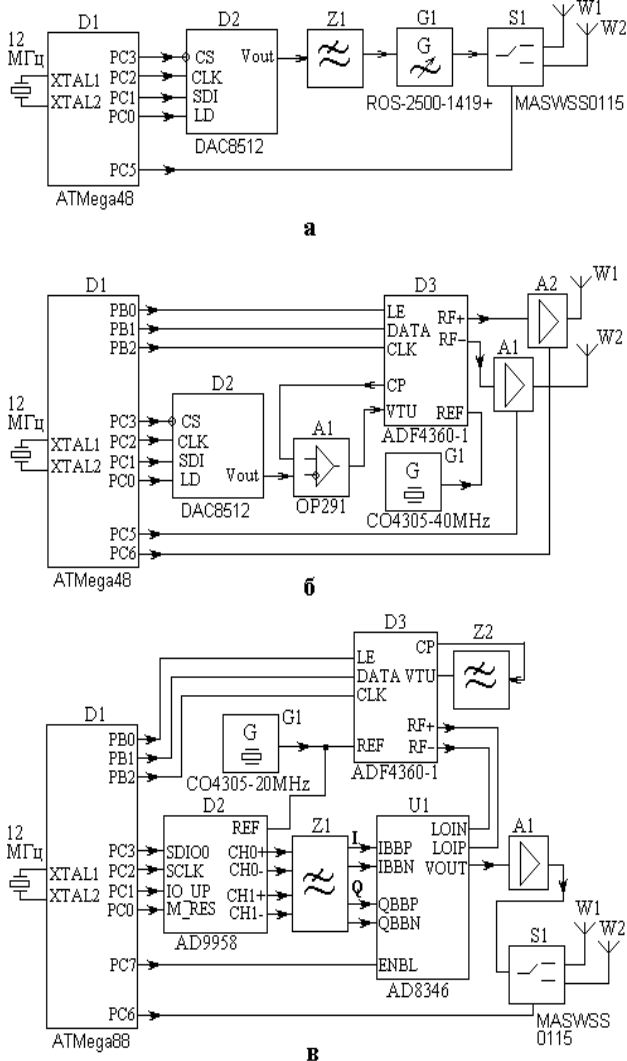


Рисунок 2 – Структурные схемы передатчиков с прямой модуляцией (а), с ФАПЧ-синтезатором частоты (б), с прямым цифровым синтезатором частоты и квадратурным повышающим преобразователем частоты (в)

Разработанный на основе синтезатора частоты ADF4360-1 радиопередатчик (рисунок 2, б) включает в себя микроконтроллер D1, связанный через последовательные порты с самим синтезатором D3 и интегральным ЦАП D2, аналогичным примененному в предыдущей конструкции. Кроме управления синтезатором и ЦАП микроконтроллер осуществляет периодическое переключение антенн в соответствии с алгоритмом измерения коэффициентов канальной матрицы MIMO системы, подавая отпирающее смещение на вывод базы одного из транзисторных усилителей СВЧ A1 или A2 (используются транзисторы BFR93). В отличие от предыдущего варианта передатчика, необходимо учитывать, что сигналы, подаваемые на антенны W1 и W2, изначально являются противофазными, так как снимаются отдельно с дифференциального выхода синтезатора частоты D3.

Колебание опорной частоты для синтезатора D3 снимается с выхода интегрального кварцевого генератора CO4305-40MHz-Ext фирмы Raltron (G1 на рисунке 2, б), отличающегося миниатюрным корпусом (5x7 мм), предназначенным для поверхностного монтажа.

Активный петлевой фильтр синтезатора A1 выполнен на экономичном операционном усилителе OP291 таким образом, что выходное напряжение ЦАП может суммироваться с управляющим напряжением ГУН, входящего в состав микросхемы синтезатора частоты. Таким образом, в данном передатчике реализовано два возможных способа угловой модуляции: путем непосредственного воздействия на ГУН пачкой импульсов произвольной формы, формируемых на выходе ЦАП, либо путем периодического перепрограммирования микроконтроллером делителя частоты с переменным коэффициентом деления, входящего в состав синтезатора частоты. Петлевой фильтр рассчитан таким образом, чтобы не подавлять высокоскоростную модуляцию, осуществляемую посредством ЦАП D2, и в то же время чтобы давать возможность синтезатору обрабатывать сравнительно низкоскоростную модуляцию, выполняемую путем перепрограммирования коэффициентов его внутренних делителей частоты. Термины «высокоскоростная» и «низкоскоростная» модуляция следует понимать в том аспекте, что по отношению к модуляции, осуществляемой в данной схеме через ЦАП, петля ФАПЧ будет вести себя как фильтр высокой частоты, компенсируя модулирующее воздействие, частота которого ниже частоты среза петлевого фильтра A1. По отношению же к модуляции посредством изменения коэффициентов деления в синтезаторе петля ФАПЧ будет вести

себя противоположным образом, т.е. как фильтр низкой частоты, не давая осуществлять модуляцию с частотой, превышающей частоту среза петлевого фильтра [6].

На структурной схеме передатчика (рисунок 2, б) не показаны интегральные стабилизаторы напряжения на +5 В и +3,3 В, аналогичные примененным в предыдущем варианте передатчика. Передатчик собран на двухсторонней печатной плате размером 70x115 мм, причем также оставлено место для пустых контактных площадок, рассчитанных на подключение дополнительных пассивных элементов типоразмера 0805 и микросхем в корпусах SO8. Общий потребляемый ток от источника +7,5...+9 В составляет 82 мА, причем 60 мА из них потребляют синтезатор и его опорный генератор.

Третий вариант разработанного для применения на борту БПЛА для проведения экспериментов радиопередатчика представлен на рисунке 2, в. Он разработан на основе схемы, показанной на рисунке 1, г; такой передатчик обеспечивает произвольный узкополосный вид модуляции и в этом плане является наиболее совершенным из всех представленных здесь вариантов, но в то же время он отличается сложностью и значительным потреблением энергии. Последнее обстоятельство привело к необходимости усложнять алгоритм работы передатчика, осуществляемый его микроконтроллером, чтобы возможно было пользоваться режимом пониженного потребления электроэнергии. В связи с этим в передатчике был применен микроконтроллер с увеличенным объемом памяти программ – АТМega88.

В радиопередатчике, представленном на рисунке 2, в, микроконтроллер D1 управляет по последовательному интерфейсу двухканальным синтезатором частоты прямого цифрового синтеза D2 (AD9958, [12]), который выполняет функцию формирования на промежуточной частоте 10 МГц квадратур сигнала с необходимым видом модуляции. В схеме принимается, что выход СНО синтезатора работает в качестве канала I, тогда как канал Q формируется на выходе СН1. Синтезатор D2 тактируется от интегрального кварцевого генератора G1, частота выходного колебания которого составляет 20 МГц; с целью упрощения схемы реконструирующего фильтра Z1 эта частота умножается в синтезаторе D2 на 10, что дает внутреннюю тактовую частоту 200 МГц. Дальнейшее увеличение внутренней тактовой частоты возможно, но нецелесообразно, так как приводит к росту энергопотребления микросхемы D2.

Квадратурные составляющие модулированного сигнала промежуточной частоты подаются на интегральный квадратурный смеситель U1 (AD8346, [4]), в котором осуществляется преобразование частоты в рабочий диапазон 2,4 ГГц, объединение квадратур и подавление зеркального канала преобразования [7]. Рабочая частота передатчика перестраивается изменением частоты гетеродина, в качестве которого применен синтезатор частоты с ФАПЧ, аналогичный использованному в предыдущем варианте передатчика. Опорный сигнал для него также снимается с генератора G1, а петлевой фильтр Z2 – пассивный.

Перенесенный на рабочую частоту сигнал с выхода смесителя подается на транзисторный усилитель СВЧ А1, аналогичный примененным в предыдущем варианте передатчика. Антенный переключатель S1, аналогичный использованному ранее в передатчике с прямой модуляцией (рисунок 2, а), осуществляет поочередное подключение одной из антенн.

На рисунке 2, в не показаны интегральные стабилизаторы напряжений +3,3 В и +1,8 В. Общий ток потребления схемы составляет 315 мА, причем около 200 мА – ток потребления синтезатора D2, а еще 80 мА потребляют в сумме микросхемы D3 и U1. Для обеспечения экономии энергии источника питания в алгоритме работы микроконтроллера предусмотрена возможность перевода трех названных микросхем в спящий режим, если это будет необходимо. Их суммарный ток потребления при этом не превышает 30 мкА.

Проведенные испытания разработанных и представленных в настоящей статье передатчиков показали их работоспособность и пригодность для применения в экспериментах по измерению коэффициентов канальной матрицы ММО системы передачи данных от БПЛА на наземный пункт управления.

Заключение. В настоящей работе представлены варианты структурных схем бортовых передатчиков БПЛА, отличающихся степенью сложности и функциональными возможностями. Все они могут быть использованы для проведения экспериментов по измерению коэффициентов канальной матрицы ММО радиоканала передачи данных от БПЛА на наземный пункт управления.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект 14-19-01263) в Рязанском государственном радиотехническом университете.

Библиографический список

1. Ксендзов А.В. Границы вероятности ошибки приема сигнала с двоичной фазовой манипуляцией в МИМО канале с коррелированными замираниями // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2010. № 31. С. 20-28.
2. Паршин Ю.Н., Ксендзов А.В. Влияние пространственной корреляции на эффективность оптимизации пространственной структуры многоантенной системы при разнесенном приеме // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2006. № 19. С. 54-62.
3. Постановление Правительства Российской Федерации от 13 октября 2011 г. №837 «О внесении изменений в постановление Правительства Российской Федерации от 12 октября 2004 г. №539» // Российская газета, 2011. 25 октября.
4. 0.8 GHz – 2.5 GHz Quadrature Modulator AD8346 (электронный ресурс) / Analog Devices, Inc. 1999. <http://www.analog.com>.
5. Дингес С.И. Мобильная связь: технология DECT. М.: СОЛОН-Пресс. 2003. 266 с.
6. Белов Л.А. Формирование стабильных частот и сигналов: учеб. пособие для студ. высш. учеб. заведе-
ний. М.: Издательский центр «Академия», 2005. 224 с.
7. *Cushing Rick*. Single-Sideband Upconversion of Quadrature DDS Signals to the 800-to-2500- MHz Band (электронный ресурс) / Analog Devices, Inc. 2000. <http://www.analog.com/library/analogDialogue/archives/34-03/upconversion/index.html>
8. Surface Mount Voltage Controlled Oscillator ROS-2500-1419+ (электронный ресурс) / Mini-Circuits, Inc. 2005. www.minicircuits.com.
9. Голуб В. Новые синтезаторы частот серии ADF4xxx // Chip News. 2002. № 4 (63). С.20-23.
10. Васильев Е.В. Цифровой трансивер ISM диапазона для обмена данными по радиоканалу с беспилотными аппаратами // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2014. № 50-2. С. 41-46.
11. Integrated Synthesizer and VCO ADF4360-1 (электронный ресурс) / Analog Devices, Inc. 2004. <http://www.analog.com>.
12. 2-Channel, 500 MSPS DDS with 10-Bit DACs AD9958 (электронный ресурс) / Analog Devices, Inc. 2008. www.analog.com.