УДК 621.37
ББК 32.84
В38

Вестник УГТУ–УПИ. Сер. радиотехн., Теория и практика радиолокации
В38 земной поверхности. 2005. № 19 (71). 235 с.

УДК 621.384.32

А.С. Боков, В.Г. Важенин, Л.П. Воробьев, Н.А. Дядьков,
В.В. Моисеев, В.В. Мухин, Ю.Г. Нестеров, А.И. Сиротин

ИМИТАЦИЯ РАДИОЛОКАЦИОННОГО СИГНАЛА, ОТРАЖЕННОГО ОТ ДВИЖУЩЕЙСЯ ЦЕЛИ

В статье рассматриваются вопросы построения имитаторов отраженных сигналов, обеспечивающих имитацию приёма излучённого сигнала РЛС, его цифровое преобразование и переизлучение в направлении приёмной антенны РЛС. Приводятся технические характеристики и возможности применения имитатора сигналов, построенного с использованием инструментального модуля МС-23.01 и одноплатной ЭВМ «Багет-83» и предназначенного для работы в составе комплексов полунатурного моделирования радиолокационных систем.

Simulator designing problems are considered in the paper. The simulator functions as a radiated radar signal receiver, digital signal processor and a reradiation towards the radar receiving antenna. Simulator specifications and applications are given for the simulator based on the tool unit MC-23.01 and a one-card PC «Baget-83». This simulator is intended to be used as a part of a semireal radar imitation.

Целью полунатурного моделирования радиолокационных систем (РЛС) является определение ее основных характеристик в условиях, максимально приближенных к штатным условиям работы. Основными тактико-техническими характеристиками РЛС являются характеристики обнаружения, флуктуационные и динамические погрешности дальномерного и угломерного каналов. Следовательно, имитатор должен обеспечивать имитацию сигнала движущейся цели с заданной эффективной поверхностью рассеяния σ (ЭПР) и параметрами движения – радиальной дальностью R, радиальной скоростью V_r, азимутом β, углом места ε и соответствующими угловыми скоростями.

При оценке основных характеристик РЛС используется эталонная нефлуктуирующая цель, для имитации которой необходимо сформировать сигнал, являющийся копией зондирующего, но задержанный на величину $2R/c$ (где c – скорость света) и смещенный по частоте на величину доплеровского сдвига $f_д = 2V_r/\lambda$ (где λ – длина волны зондирующего сигнала). При этом R и V_r должны непрерывно изменяться в соответствии с заданным законом движения цели. Мощность, создаваемая сигналом имитатора на входе приемного устройства РЛС должна равняться мощности сигнала, отраженного от цели с заданной ЭПР, находящейся на дальности R. Угловое положение цели имитируется электромеханической системой, обеспечивающей установку требуемых угловых

координат имитатора отраженного сигнала относительно РЛС и скоростей их изменения. Поскольку имитатор крепится на подвижном основании, предъявляются жесткие требования к его массогабаритным характеристикам и линиям связи со стационарной частью комплекса полунатурного моделирования (КПМ).

В современных РЛС, как правило, используются сложные широкополосные сигналы и когерентная обработка отраженного сигнала, причем параметры и закон модуляции зондирующего сигнала могут адаптироваться к текущим условиям наблюдения цели (дальность, скорость, помеховая обстановка) и режимам работы РЛС (обнаружение, сопровождение цели). В этих условиях имитатор должен обеспечивать формирование имитируемого сигнала, когерентного с зондирующим сигналом с точностью до доплеровского сдвига частоты и случайной фазы отражения от цели. Реализация имитатора отраженного сигнала методом задержки модулирующей функции для РЛС со сложными сигналами приведет к необходимости передачи нескольких сигналов от РЛС к имитатору и воспроизведению в имитаторе передающей части РЛС. При этом потребуется доработка РЛС для обеспечения выдачи дополнительных сигналов (управления, синхронизации и т.д.). Кроме того, любые изменения модулирующей функции в процессе отработки режимов работы РЛС приводят к доработке имитатора.

При использовании аналоговых линий задержки и преобразователей частоты для имитации доплеровского сдвига чрезвычайно сложно обеспечить широкий диапазон изменения дальности с дискретом даже в десятки метров и доплеровских сдвигов частоты в диапазоне до десятков килогерц с дискретом единицы герц.

Создание имитатора сигналов, обеспечивающего когерентность имитируемого сигнала, динамическое изменение его задержки с дискретом в единицы метров и доплеровского сдвига частоты с дискретом единицы герц, стало возможным благодаря появлению цифровых процессоров обработки сигналов с производительностью, обеспечивающей преобразование зондирующего сигнала (задержку и доплеровское смещение частоты) в реальном масштабе времени при ширине спектра зондирующего сигнала в десятки мегагерц.

Процесс преобразования зондирующего сигнала в имитаторе можно представить в виде блок-схемы, представленной на рис. 1.

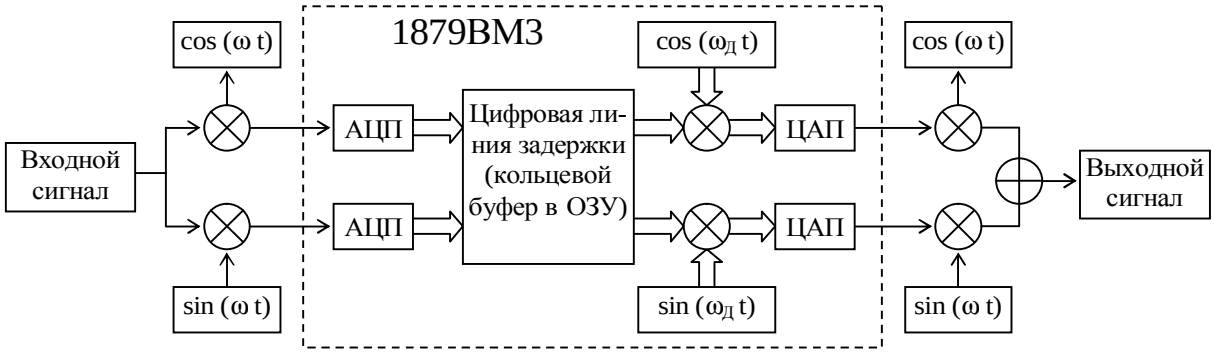


Рис. 1. Блок-схема преобразования сигнала

Одним из специализированных процессоров, обеспечивающих такое преобразование сигналов, является быстродействующий программируемый контроллер 1879ВМ3 (разработан НТЦ Модуль, г. Москва) [1] со встроенными 6-разрядными аналого-цифровыми (АЦП) и 8-разрядными цифроаналоговыми (ЦАП) преобразователями с частотой преобразования до 600 МГц, обеспечивающий задержку и смещение частоты входного сигнала с полосой до 300 МГц.

На рис. 2 приведена упрощенная структурная схема контроллера 1879ВМ3.

Входными сигналами контроллера являются квадратурные составляющие аналогового сигнала, квантуемые с частотой до 600 МГц, которые упаковываются в 64-разрядные слова и затем могут быть преобразованы и записаны либо в память, либо выданы непосредственно на выходные ЦАП. Выходным сигналом контроллера являются выборки аналоговых значений квадратурных составляющих преобразованного входного сигнала.

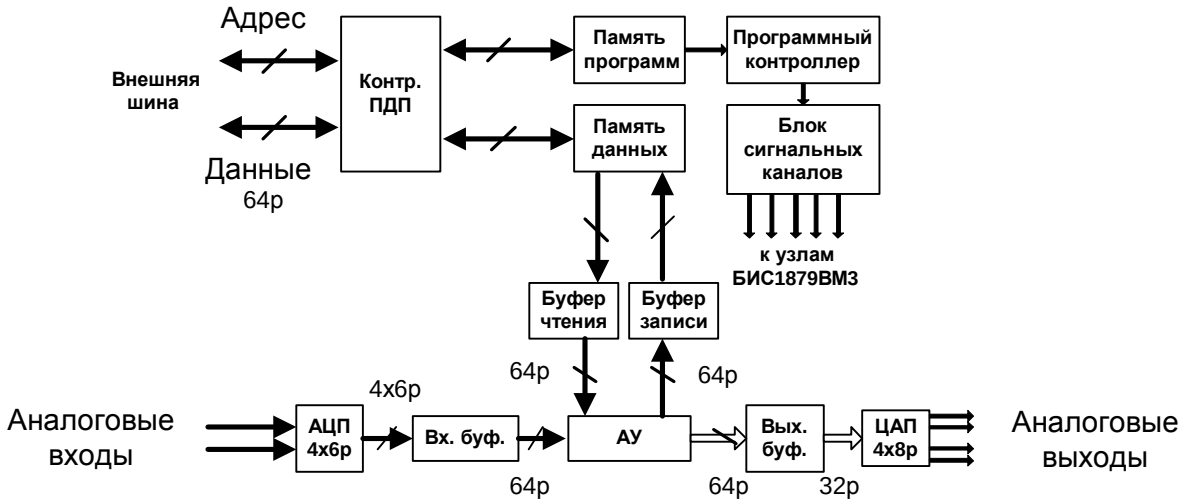


Рис. 2. Упрощенная структурная схема контроллера 1879ВМ3

Трехпортовое ОЗУ данных объемом 192 Кбайт и 8 сигнальных каналов управления обеспечивает параллельную запись входного, воспроизведение выходного сигналов и обмен с внешней памятью в режиме ПДП.

Двухпортовая память команд объемом 64 Кбайт обеспечивает параллельное исполнение рабочей программы и ее модификацию в режиме ПДП. Это позволяет организовать работу контроллера в режиме «циклического» буфера, т.е. воспроизводить на выходе задержанный и смещенный по частоте входной сигнал сколь угодно большой длительности без разрывов при динамическом изменении задержи и доплеровского сдвига, что дает возможность имитировать задержанный сигнал при произвольном законе модуляции входного без дополнительных синхронизирующих связей между имитатором сигналов и РЛС.

Контроллер обеспечивает подключение внешнего ОЗУ объемом до 64 Мбайт по скоростной параллельной шине с тактовой частотой до 150 МГц.

При использовании только внутреннего ОЗУ контроллер обеспечивает программно-управляемую задержку входного сигнала в диапазоне от 35 нс до 163 мкс с шагом 13,33 нс и смещение частоты в диапазоне ± 293 КГц с шагом 8,94 Гц. При использовании внешнего ОЗУ и управляющего процессора диапазон задержек может быть существенно расширен.

При разработке имитатора сигналов РЛС с аналого-цифровым преобразованием зондирующего сигнала были использованы инструментальный модуль МС-23.01 (разработка и выпуск – НТЦ «Модуль»), содержащий контроллер 1879ВМ3, и одноплатная ЭВМ Багет-83 (разработка и выпуск НИИ Системных исследований РАН и КБ «Корунд-М», г. Москва). Функциональная схема имитатора представлена на рис. 2.

В целом имитатор отраженного сигнала представляет собой конструктивно законченный модуль, содержащий аналоговые узлы приема излученного РЛС сигнала с регулируемым усилением и преобразованием частоты, обеспечивающий смещение частоты зондирующего сигнала в рабочую область частот СБИС 1879ВМ3 и формирование квадратурных составляющих, узел аналого-цифрового преобразования сигнала и передающего устройства с регулируемым усилением, обеспечивающего перенос имитируемого сигнала на частоту зондирующего и излучение имитированного сигнала.

Для повышения точности имитации углового положения цели в имитаторе используется одна приемопередающая антенна. При этом возникает вопрос выбора параметров имитатора, обеспечивающих его устойчивость с учетом связи между входом приемного и выходом передающего тракта.

С учетом этой связи имитатор представляет собой широкополосную аналого-цифровую систему с переменными параметрами и задержанной обратной связью. Поскольку оценка фазовых соотношений в такой системе практически нереальна, ограничимся оценкой модуля коэффициента передачи разомкнутой системы.

Мощность сигнала, отраженного от цели на входе приемника радиолокатора при общей приемопередающей антенне и осесимметричной ДНА можно рассчитать, пользуясь известной формулой радиолокации [3].

$$P_{\text{ц}} = P_0 G_0^2 \lambda^2 \sigma \Big/ \left(64\pi^3 R^4\right), \qquad (1)$$

где P_0 – мощность на выходе передатчика; G_0 – коэффициент усиления приемопередающей антенны; σ – эффективная поверхность рассеяния цели; λ – длина волны зондирующего сигнала; R – расстояние до цели.

Мощность сигнала, принятого от имитатора на входе приемника радиолокатора, можно рассчитать по формуле радиолокации с активным ответом [3].

$$P_{\text{иц}} = P_{\text{и}} G_0 G_{\text{и}0} \lambda^2 \Big/ \left(16\pi^2 R_{\text{и}}^2\right), \qquad (2)$$

где $P_{\text{и}}$ – мощность на выходе передатчика имитатора; $R_{\text{и}}$ – расстояние до имитатора; $G_{\text{и}0}$ – коэффициент усиления антенны имитатора.

Приравнивая $P_{\text{иц}} = P_{\text{ц}}$, получим следующее выражение для выходной мощности имитатора, обеспечивающего имитацию цели с ЭПР σ на дальности R:

$$P_{\text{и}} = P_0 G_0 R_{\text{и}}^2 \Big/ \left(4\pi^2 R_{\text{и}}^2 G_{\text{и}0}\right). \qquad (3)$$

Мощность сигнала на выходе приемной антенны имитатора

$$P_{\text{пи}} = P_{0\text{и}} G_0 G(\theta_{\text{и}}) G_{\text{и}0} G_{\text{и}}(\theta_{\text{ии}}) \lambda^2 \Big/ \left(16\pi^2 R_{\text{и}}^2\right), \qquad (4)$$

где $P_{0\text{и}}$ – мощность, излучаемая изделием при полунатурном моделировании.

Для выполнения равенства $P_{\text{иц}} = P_{\text{ц}}$ имитатор должен иметь коэффициент передачи по мощности $P_{\text{и}}/P_{\text{пи}}$, равный

$$K_{\text{и}} = P_0 \sigma R_{\text{и}}^4 4\pi \Big/ \left(P_{0\text{и}} G_{\text{и}0}^2 \lambda^2 R^4 \right). \qquad (5)$$

Коэффициент передачи разомкнутой системы

$$K_{\text{р}} = K_{\text{вв}} K_{\text{и}}, \qquad (6)$$

где $K_{\text{вв}}$ – коэффициент передачи от выхода передатчика к входу приемника.

Из условия абсолютной устойчивости $K_{\text{р}} < 1$ легко получить соотношение между параметрами имитатора, гарантирующими его устойчивость:

$$K_{\text{вв}} P_0 \sigma R_{\text{и}}^4 4\pi \Big/ \left(P_{0\text{и}} G_{\text{и}0}^2 \lambda^2 R^4 \right) < 1. \qquad (7)$$

Функциональная схема имитатора приведена на рис. 3.

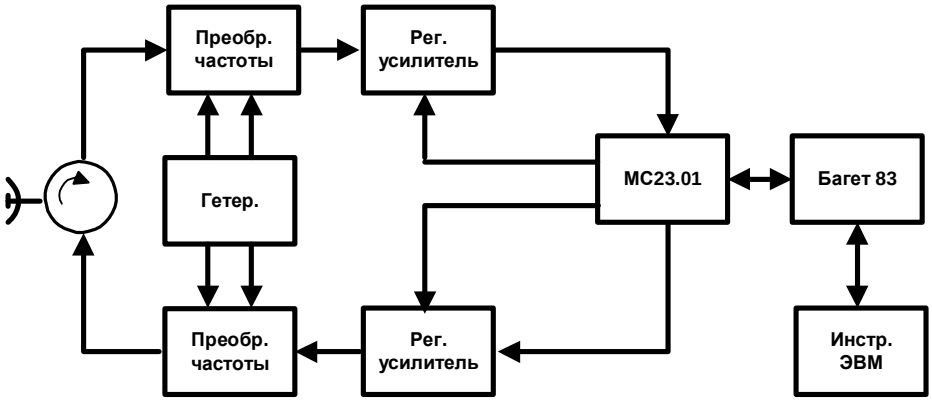


Рис. 3. Функциональная схема имитатора

Приемо-передающая часть имитатора построена по схеме с двойным преобразованием частоты, что позволяет простой заменой узла первичного преобразователя согласовать имитатор с РЛС различных диапазонов волн – от метровых до миллиметровых.

Инструментальный модуль МС-23.01 содержит входные нормирующие усилители, обеспечивающие согласование входных линий с входами АЦП СБИС 1879ВМ3, и выходные аналоговые схемы для восстановления квадратурных составляющих из выборок выходных сигналов СБИС. Узел ввода-вывода дискретных сигналов и запросов прерываний (20 линий ввода-вывода и 8 запросов прерываний) используются для управления узлами приемопередающих устройств имитатора. Кроме того, модуль содержит блок синхронной динамической памяти объемом 64 Мбайт и контроллер шины *PCI* 32 бит 33 МГц, соответствующий стандарту *PCI* 2.1.

Одноплатная ЭВМ Багет-83, представляющая собой процессорный модуль в стандарте *PC*/104-*Plus PCI-only* на основе процессора *B*-812, обеспечивает начальную загрузку программ в модуль *МС*23.01, формирование законов изменения задержки и доплеровского сдвига частоты в соответствии с заданной траекторией движения имитируемой цели. Работа ЭВМ Багет-83 осуществляется

под управлением операционной системы реального времени ОСРВ Багет 2.0 (разработка НИИ Системных исследований РАН).

Для подготовки и отладки программного обеспечения используется инструментальная ЭВМ, работающая под управлением ОС *Linux* с установленными средствами разработки и отладки прикладного программного обеспечения и под управлением ОС *Windows* с пакетом разработки программного обеспечения модуля *МС*-23.01. Связь с ЭВМ Багет 83 обеспечивается по интерфейсу *RS*-232.

Программное обеспечение инструментальной ЭВМ обеспечивает подключение имитатора к КПМ для моделирования работы подвижных РЛС с учетом движений как цели, так и носителя РЛС. Связь с КПМ осуществляется по сети *Ethernet* с поддержкой протокола обмена *TCP/IP*. При этом в режиме реального времени инструментальная ЭВМ обеспечивает прием информации о текущей дальности до цели и скорости сближения РЛС с целью от внешней управляющей системы и передаёт соответствующие данные в имитатор сигнала.

Разработанный имитатор имеет следующие технические характеристики (при тактовой частоте контроллера 1879ВМ3 600 МГц):

– несущая частота f_0 зондирующего сигнала – от сотен мегагерц до десятков гигагерц определяется сменным узлом первого преобразователя частоты;

– полоса частот входного сигнала – $f_0 \pm 50$ МГц;

– длительность зондирующего сигнала – не ограничена;

– имитируемый диапазон задержек от 35 нс до 163 мкс с возможностью расширения;

– шаг изменения задержки – 13,33 нс (2 метра);

– имитируемый диапазон доплеровских сдвигов частоты - ± 293 кГц;

– шаг изменения доплеровской частоты – 8,94 Гц;

– регулировка усиления в приемном тракте – 50 дБ с шагом 1 дБ;

– регулировка усиления в передающем тракте – 50 дБ с шагом 1 дБ;

– уровень собственных шумов – минус 35 дБ относительно максимального уровня сигнала на входе узла АЦП.

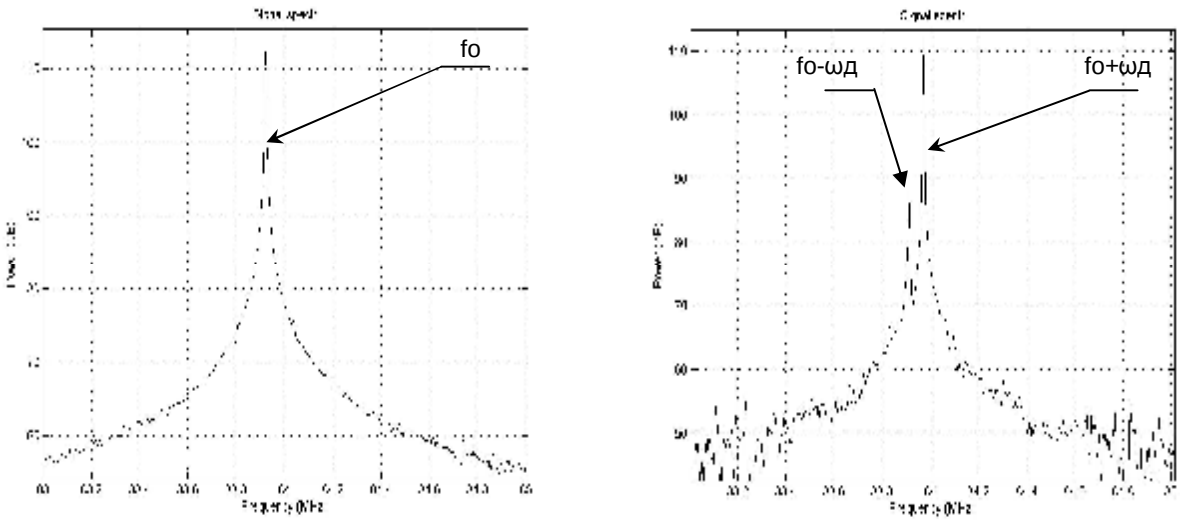
Программное обеспечение содержит:

– средства разработки и отладки прикладного программного обеспечения имитатора;

– интерфейс оператора, обеспечивающий работу в автономном режиме и в составе комплексов полунатурного моделирования.

Общая масса имитатора (без инструментальной ЭВМ) составляет не более 5 кг, что позволяет размещать имитатор на подвижных устройствах, имитирующих угловое перемещение цели относительно РЛС.

Примеры спектров сигналов биений радиолокатора с ЛЧМ, полученных в ходе испытаний, с имитацией цели с нулевой и ненулевой радиальной скоростью приведены на рис. 4.



а *б*

Рис. 4. Спектры сигналов при имитации цели:
а – с нулевой радиальной скоростью;
б – с ненулевой радиальной скоростью

Из рисунков видно, что при отсутствии доплеровского смещения частоты паразитные составляющие в спектре сигнала биений практически отсутствуют. При смещении частоты излученного сигнала подавление паразитных продуктов преобразования составляет более 25 дБ.

С помощью дополнительного процессора возможно обеспечить формирование нескольких копий излученного сигнала, имеющих различную задержку и доплеровский сдвиг, и таким образом обеспечивать имитацию распределенных целей. Например, такое существенное расширение функциональных возможностей имитатора возможно обеспечить путем использования дополнительного процессора цифровой обработки сигналов 1879ВМ1, в перспективе – 1879ВМ2, внешний интерфейс которых совместим с интерфейсом 1879ВМ3, при этом обеспечивается работа над общей внешней памятью без использования дополнительных схем управления.

---

1. Микросхема интегральная 1879ВМ3(DSM) техническое описание. Версия 1.1 ЮФКВ 431268 001 ТО1 К. М.: НТЦ «Модуль», 2003.
2. Коростелев А.А. Теоретические основы радиолокации: учебное пособие для вузов / А.А. Коростелев [и др.]; под ред. В.Е. Дулевича. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Сов. радио, 1978. 608 с.