

Генерация и измерение параметров импульсных радиолокационных сигналов

Учебное пособие

Изделия:

- ┆ R&S®SMW
- ┆ R&S®SMBV
- ┆ R&S®FSW
- ┆ R&S®FSV
- ┆ R&S®RTM
- ┆ R&S®BBA150
- ┆ R&S®HF907

Настоящее учебное пособие предназначено для студентов технических специальностей, которые хотят научиться проводить испытания с использованием импульсных и ЛЧМ-сигналов.

Современные тенденции развития радиолокационных систем (РЛС) направлены на удовлетворение потребностей в области обработки сигналов. Это учитывается в настоящем учебном пособии, где приборы R&S®SMW / SMBV на стороне передатчика и приборы R&S®FSW / FSV на стороне приемника объединены в РЛС с обратной связью, обеспечивающую возможность радиолокационного обнаружения с помощью метода сжатия импульсов и алгоритмов цифровой обработки сигналов. Кроме того, здесь приводится описание соответствующих программных инструментов R&S для таких приложений, и рассматриваются вопросы взаимодействия между этими инструментами и контрольно-измерительными приборами.

Импульсные РЛС сигналы – 1MA234_0e

Содержание

1	Введение	3
1.1	Актуальность задачи.....	3
1.2	Сокращения наименований изделий.....	3
1.3	Демонстрация метода сжатия импульсов.....	4
2	Прикладные радиолокационные системы.....	8
2.1	Использование кодов Баркера в приемопередающей системе	8
2.2	Приложение для РЛС с обратной связью	9
2.3	Обнаружение и имитация движущихся объектов	12
3	Программное решение компании R&S для генерации радиолокационных сигналов	17
4	Анализ требований к мощности сигнала.....	19
5	Приложение.....	25
5.1	Программы в среде MATLAB.....	25
5.1.1	Взаимная корреляция с использованием кодов Баркера.....	25
5.1.2	Сценарии расчета импульсной мощности	27
5.1.3	РЛС с обратной связью	28
5.2	Библиография.....	34
6	О компании Rohde & Schwarz.....	36

1 Введение

1.1 Актуальность задачи

Современные радиолокационные системы (РЛС) состоят из электронных ВЧ-компонентов и блоков обработки сигналов с соответствующим ПО. Хотя тенденции развития ВЧ-электроники главным образом направлены на расширение полосы измерения и повышение скорости сбора данных, основной задачей в части блока обработки сигналов является усовершенствование алгоритмов обработки, что позволит решать все больше задач, ранее выполняемых электронными ВЧ-компонентами.

Все это учитывается в настоящем учебном пособии, где наряду с соответствующими контрольно-измерительными приборами рассматриваются возможности обработки внутренних и внешних сигналов. В файлах сценариев MATLAB приводится описание способов обработки сигналов, и рассматриваются вопросы их использования для обеспечения взаимодействия между внешними инструментами и контрольно-измерительными приборами.

Кроме того, в настоящем учебном пособии описывается настройка полноценной радиолокационной системы с использованием соответствующих серийных контрольно-измерительных приборов компании Rohde & Schwarz, и демонстрируются возможности обработки сигналов современных РЛС с помощью прикладных программ MATLAB. Все рассмотренные в настоящем документе примеры могут быть с легкостью воспроизведены и приведены в соответствие специальным требованиям с помощью исходного кода MATLAB, приведенного в приложении. Поскольку рассмотренные испытания РЛС независимы друг от друга, только отдельные части представленных программ могут быть выделены и использованы в соответствующих целях.

Настоящее учебное пособие предназначено для студентов технических специальностей, которые хотят научиться проводить испытания с использованием импульсных и ЛЧМ-сигналов.

1.2 Сокращения наименований изделий

В настоящем учебном пособии используются следующие сокращения наименований изделий:

Векторный генератор сигналов R&S®SMW200A:	SMW
Векторный генератор сигналов R&S®SMBV100A:	SMBV
Анализатор спектра и сигналов R&S®FSW:	FSW
Анализатор спектра и сигналов R&S®FSV:	FSV
Цифровой осциллограф R&S®RTM:	RTM
Широкополосный усилитель R&S®BBA150:	BBA150
Двухребневая волноводно-рупорная антенна R&S®HF907:	HF907

1.3 Демонстрация метода сжатия импульсов

Сжатие импульсов – это математический метод уменьшения эффективной ширины импульса при неизменной энергии переданного сигнала на входе приемника. Использование импульсов малой длительности обеспечивает требуемое разрешение по дальности, т.е. способность в разделении (разрешении) нескольких целей, движущихся на небольшом расстоянии друг от друга с одинаковыми радиальными скоростями. Таким образом, сжатие импульсов является важным методом улучшения характеристик радиолокационных систем.

На рисунке 1-1 показан типичный пример.

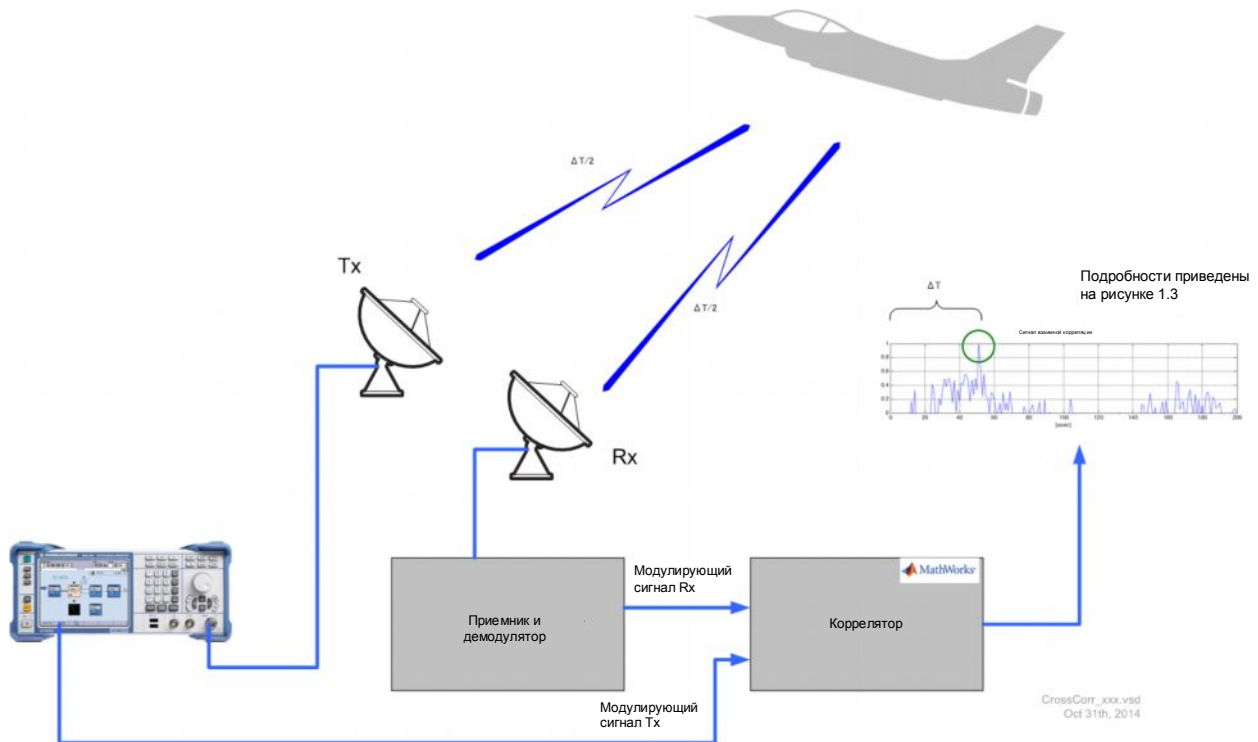


Рисунок 1-1 – Пример метода сжатия импульсов

Сигнал с выхода генератора поступает на передающую антенну, которая излучает соответствующий сигнал в направлении летящего объекта. Задержанный отраженный сигнал Rx, порой ослабленный почти до уровня собственных шумов системы, принимается, демодулируется и затем передается в "коррелятор", в котором выполняется сравнение переданного и принятого модулирующих сигналов. Поскольку рассматриваемая система является когерентной, в передатчик и приемник поступает один и тот же сигнал опорной частоты, не показанный на рисунке 1-1. В основе работы коррелятора лежит математический алгоритм, обеспечивающий возможность определения временного положения известного модулирующего сигнала передатчика Tx в пределах зашумленного модулирующего сигнала приемника Rx. Таким образом, на выходе коррелятора формируется одиночный импульс, содержащий информацию о расстоянии до самолета. Коррелятор, как правило, применяется в блоке цифровой обработки сигналов (ЦОС) приемника. В рассматриваемом примере он реализован в небольшом участке программного кода MATLAB (см. приложение 5.1).

Демонстрация метода сжатия импульсов

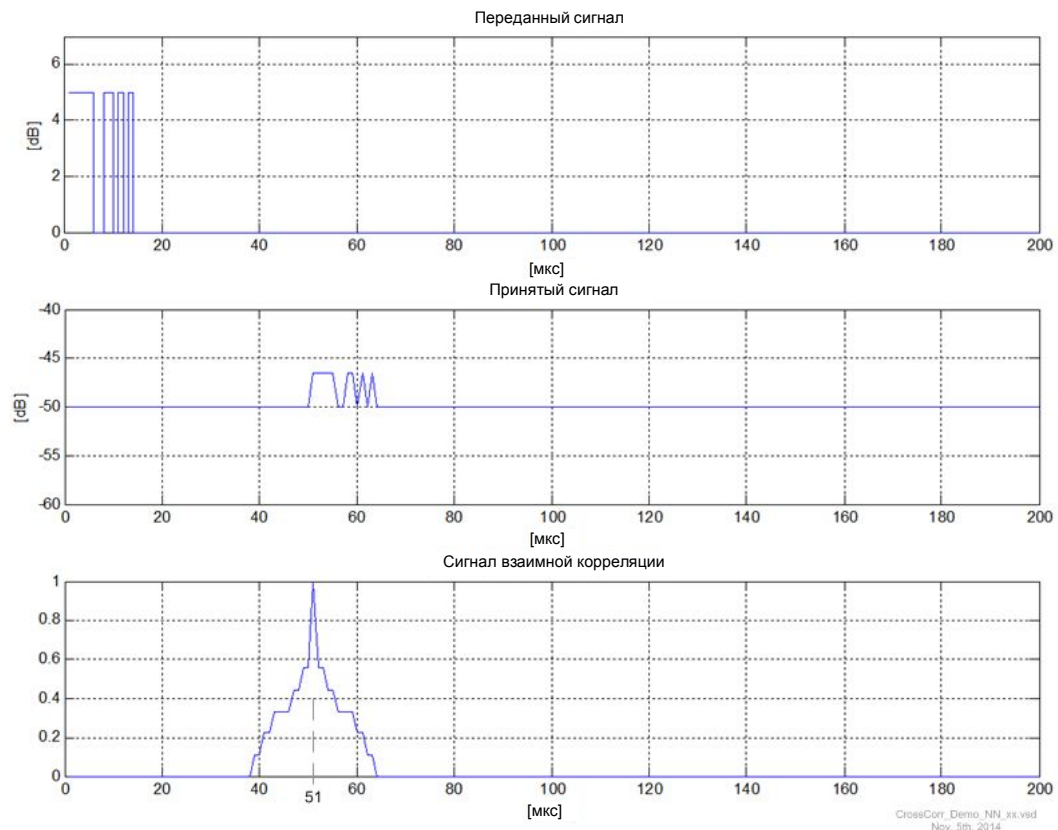


Рисунок 1-2 – Сигнал взаимной корреляции T_x / R_x с использованием кода Баркера при отсутствии шума

На рисунке 1-2 рассмотрен идеальный случай при отсутствии шума. На верхней диаграмме показан 13-битный код Баркера, который используется для BPSK-модуляции в передатчике, и вырабатывается, например, генератором сигналов SMBV, как показано на рисунке 1-1. На центральной диаграмме рисунка 1-2 показан принятый и демодулированный BPSK-сигнал. Наконец, на нижней диаграмме показан сигнал на выходе коррелятора с пиком на 51 мкс. Это значение времени представляет собой задержку смоделированного сигнала.

Демонстрация метода сжатия импульсов

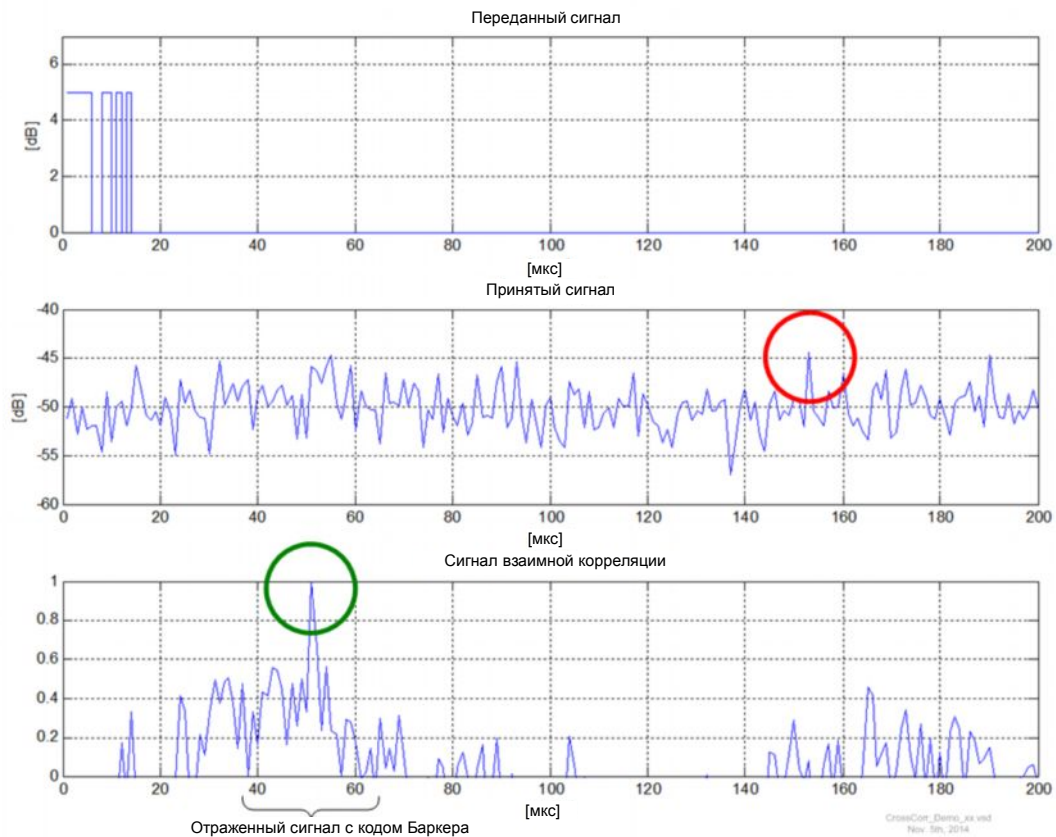


Рисунок 1-3 – Сигнал взаимной корреляции T_x / R_x с использованием кода Баркера при наличии шума

На рисунке 1-3 рассмотрен реальный случай с шумом в принятом сигнале. Хотя в принятом сигнале имеется ярко выраженный пик на 155 мкс (красная окружность), истинный сигнал четко детектируется на 51 мкс (зеленая окружность).

Этот пример показывает, что использование метода сжатия импульсов позволяет значительно повысить отношение сигнал-шум в приеме-передающем тракте. Для получения подобных результатов аппаратными средствами с целью повышения чувствительности потребовалось бы увеличить мощность передачи или внести улучшения в электронную схему приемника. Таким образом, пример показывает, что чувствительность системы может быть повышена с помощью цифровой обработки сигналов, тогда как достижение этого аппаратными средствами требует намного больше усилий и затрат. Кроме того, в примере поясняется понятие "сжатие импульсов". Хотя сигнал с кодом Баркера принимается полностью, он появляется на диаграмме лишь в виде небольшого пика (зеленая окружность на рисунке 1-2), что вызвано применением алгоритма корреляции. Это позволяет устранить недостатки, связанные с применением длинных импульсов, и в то же время пользоваться преимуществами импульсов малой длительности. В импульсах с кодом Баркера используется особая битовая последовательность, обеспечивающая минимизацию уровня боковых лепестков при применении функции корреляции. Другими словами, их автокорреляционная функция имеет высокий центральный уровень и очень низкий уровень боковых лепестков, как показано на рисунке 1-2. Для получения дополнительной информации обратитесь к источнику [17].

Полный текст программы моделирования MATLAB для этого примера приведен в приложении 5.1. Форма сигналов будет различаться при каждом запуске ПО из-за использования генератора случайного шума, однако определяемая при этом

Демонстрация метода сжатия импульсов

задержка импульсов может считаться достоверной. Дополнительные условия испытаний, такие как изменение длины кодов Баркера, увеличение/уменьшение уровня шума или использование других кодов, могут быть получены с помощью представленной прикладной программы MATLAB.

Несмотря на то, что генератор SMBV поддерживает все описанные в этом разделе сигналы и виды модуляции, его максимальная выходная мощность ограничена уровнем 19 дБмВт, чего может быть недостаточно для обнаружения самолетов на больших дальностях. Вопросы расчета мощности с учетом характеристик приемника подробно рассматриваются в главе 4. В реальной системе, построенной на базе этой модели, должен быть использован источник опорного сигнала, подключенный между передатчиков и приемником. Тем не менее, наличие фазово-когерентной связи между передатчиком и приемником необязательно. В следующей главе рассматривается радиолокационная система, состоящая только из контрольно-измерительных приборов R&S, включая передатчик и приемник.

2 Прикладные радиолокационные системы

2.1 Использование кодов Баркера в приемопередающей системе

На рисунке 2-1 рассмотрена типичная приемопередающая РЛС. Соответствующие изделия R&S показаны в нижней части рисунка. Программное обеспечение отмечено серыми прямоугольниками в верхней части рисунка. Начиная с модулирующего сигнала(кода Баркера или ЛЧМ-сигнала), показанного в левой верхней части рисунка 2-1, выполняется расчет характеристик сигнала с IQ-модуляцией и его последующая передача в передатчик РЛС, показанный в левой нижней части рисунка.

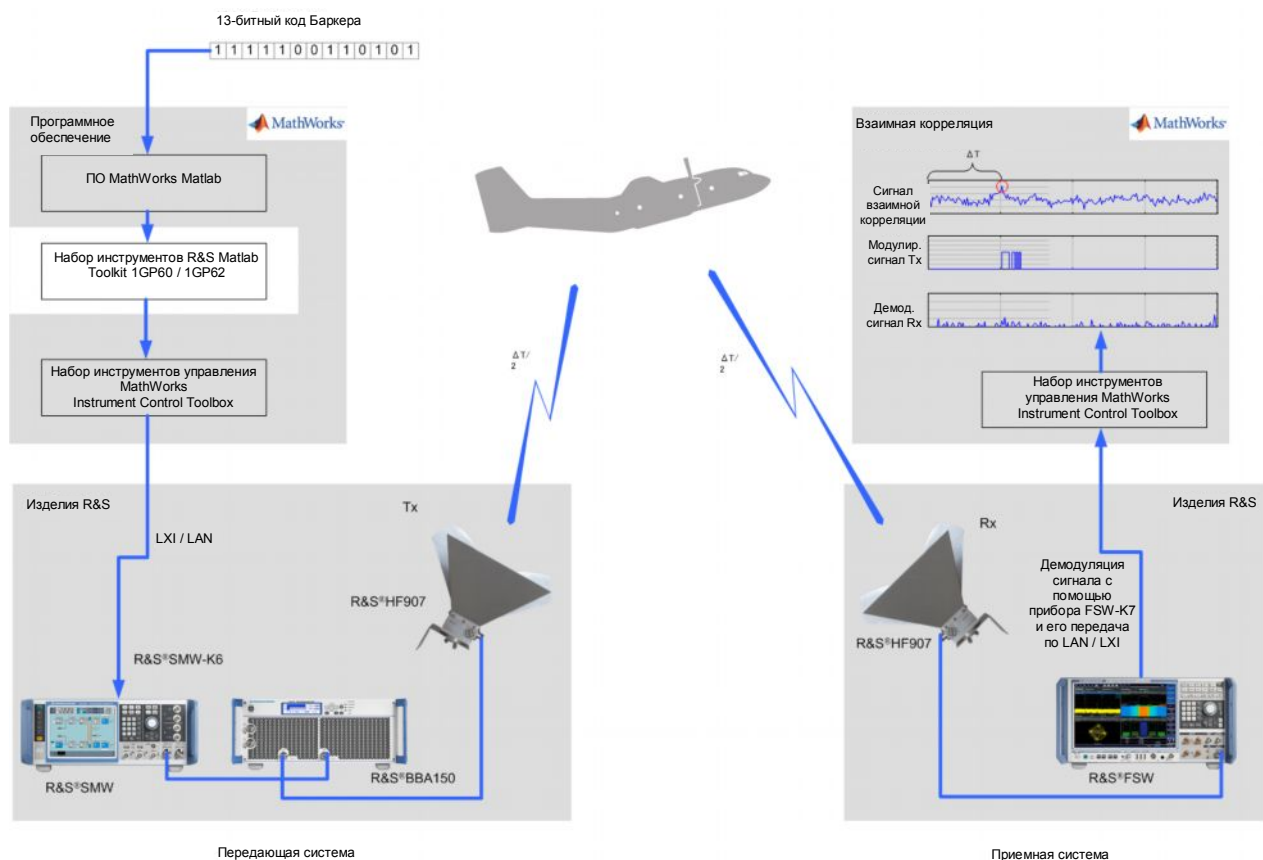


Рисунок 2-1 – Формирование и расчет характеристик модулированных сигналов с кодом Баркера

Поскольку рассматриваемая система когерентна и моностатична, приемник и передатчик работают на общей опорной частоте, которая для простоты не показана на рисунках 2-1 и 2-2. При этом наличие фазовой синхронизации необязательно.

Радиосигнал может быть передан или принят по радиointерфейсу, а также непосредственно подан на испытуемое аппаратное устройство, что подробно описано в источнике [4]. Как показано во введении, сжатие импульсов осуществляется с помощью функции взаимной корреляции между переданным и принятым/демодулированным модулирующими сигналами. Из характеристик кодов Баркера следует, что функция корреляции, как правило, имеет очень высокий центральный уровень и низкий уровень боковых лепестков, на которые влияет только шум, поступающий из приемопередающего тракта.

До этого момента здесь не учитывался тот факт, что уровень входной мощности может оказаться недостаточно высоким для запуска приемного блока, в данном случае прибора FSW. Связанные с мощностью ограничения подробно рассматриваются в главе 4 "Анализ требований к мощности сигнала" и должны учитываться при проектировании таких систем.

2.2 Приложение для РЛС с обратной связью

В предыдущей главе был приведен пример, в котором для передачи использовался непрерывный модулирующий сигнал, а в этой рассматривается ситуация, когда переданный модулирующий сигнал получается из принятого сигнала после первоначальной передачи исходного сигнала. Повторная передача измененных сигналов широко используется в приложениях радиоэлектронной защиты и противодействия (ЕСМ) для создания помех летательным аппаратам противника. На рисунке 2-2 показан простой пример, в котором изменяются лишь два бита принятой битовой последовательности. Тем не менее, поскольку работа ПО MATLAB не зависит от окружения, ограничения по сложности алгоритма практически отсутствуют. Сложные алгоритмы шифрования/дешифрования могут быть разработаны, испытаны и загружены в ПЛИС с помощью соответствующих наборов инструментов Mathworks.

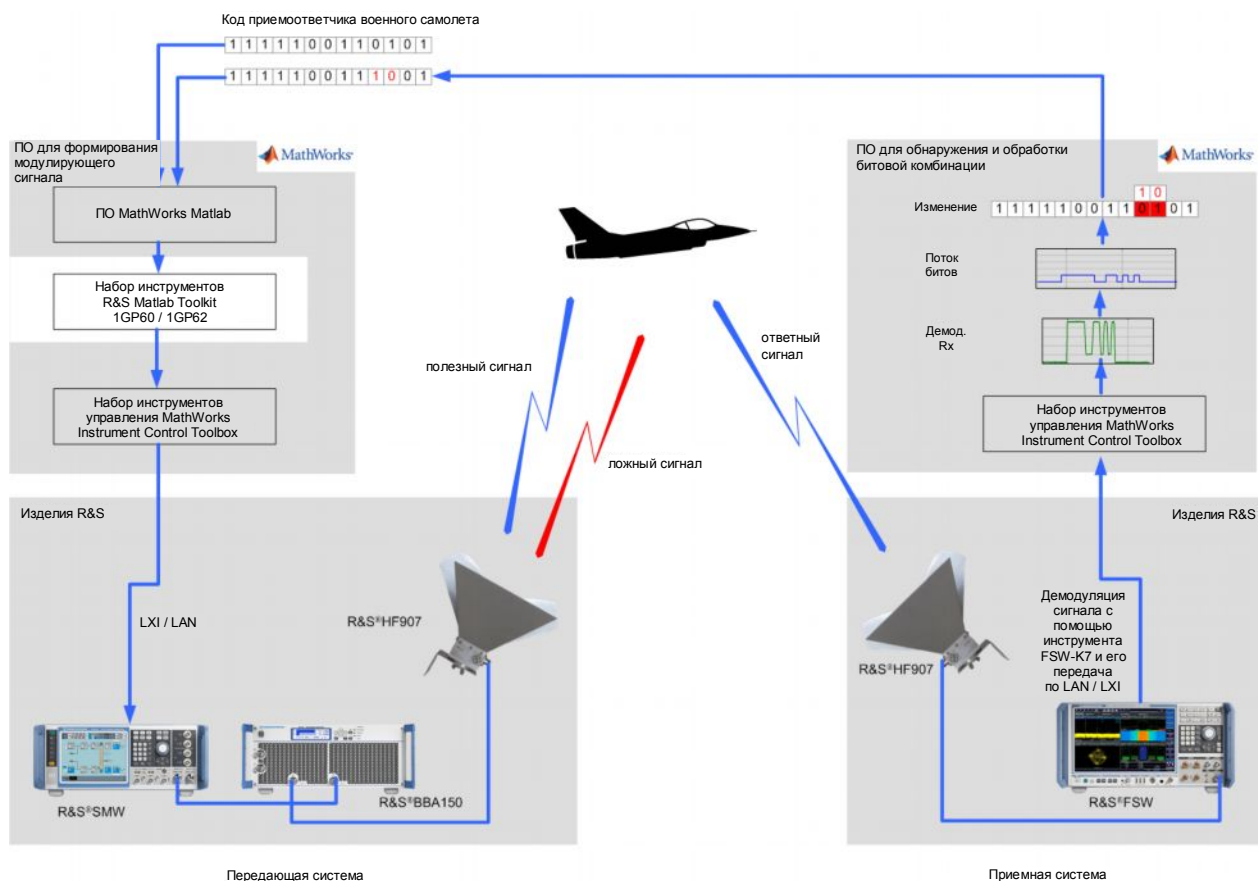


Рисунок 2-2 – Радиолокационная система с обратной связью

В этом примере для BPSK-модуляции используется произвольная битовая последовательность. На рисунке 2-2 показаны этапы обработки сигнала с помощью ПО MATLAB. Соответствующие результаты отображены на рисунке 2-3.

Программа рассмотрена в приложении 5.1.3 и доступна вместе с настоящим учебным пособием [16]. Для обеспечения надлежащей работы ПО необходимо, чтобы на генератор сигналов и анализатор спектра поступал общий опорный сигнал. Кроме того, анализатор спектра запускается по маркеру, получаемому от генератора сигналов. Для полной ясности отметим, что кабель опорного сигнала и кабель сигнала запуска на рисунке 2-2 не показаны.

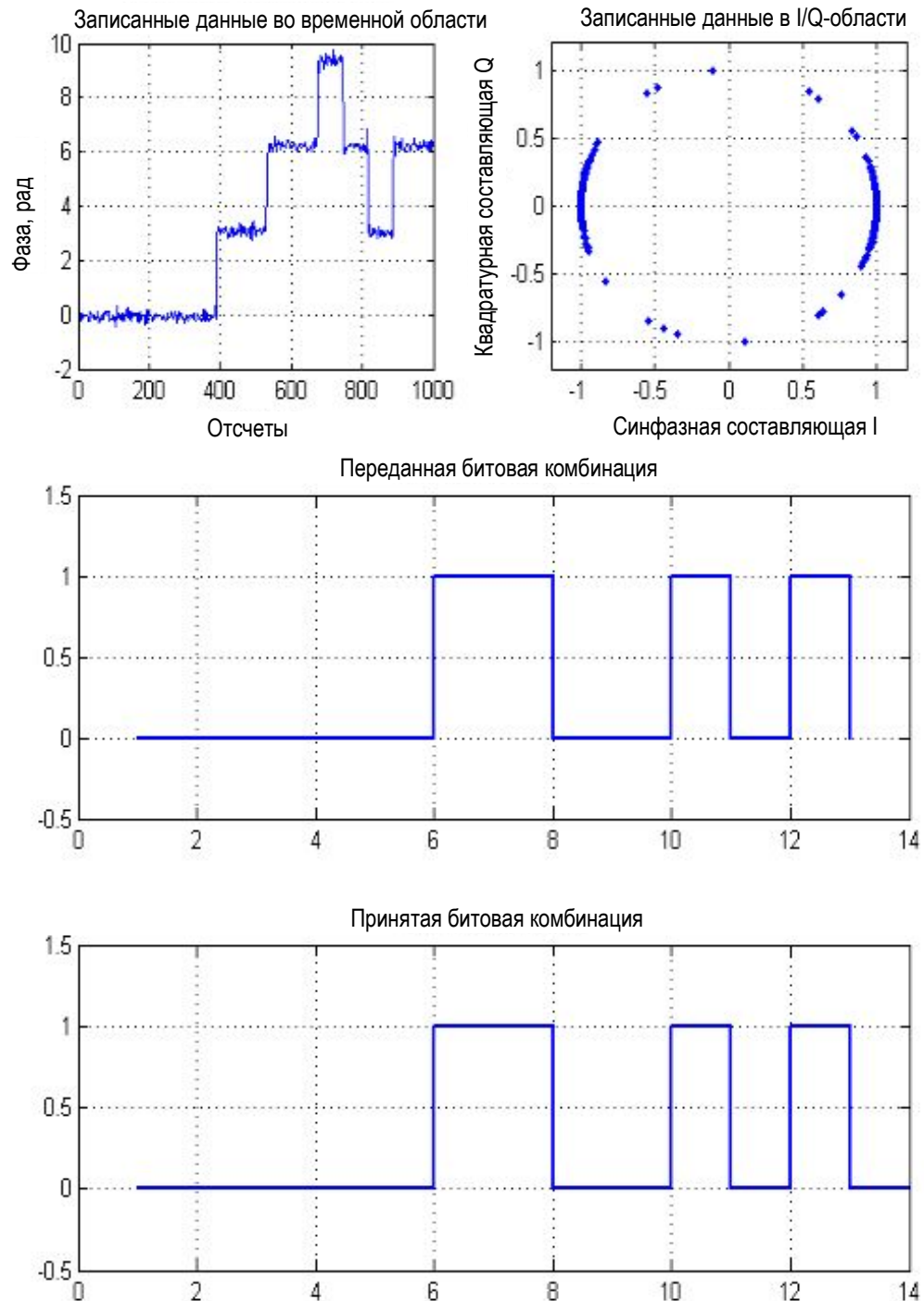


Рисунок 2-3 – Восстановление битовых данных по демодулированному сигналу

Приложение для РЛС с обратной связью

На диаграмме в левой верхней части рисунка 2-3 показан демодулированный сигнал, полученный от анализатора сигналов FSW. Для этого также может быть использован анализатор FSV. С помощью команд MATLAB (см. приложение 5.1.3) может быть получена I/Q-диаграмма сигнального созвездия, показанная в правой верхней части рисунка. Битовая последовательность может быть с легкостью определена с помощью I/Q-вектора сигнального созвездия. На двух нижних диаграммах рисунка 2-3 показаны исходная и принятая битовые последовательности. Принятая битовая последовательность может быть использована для расчета характеристик активной преднамеренной помехи, которую можно использовать в качестве помехи для летательных аппаратов противника путем ее отправки в том направлении, откуда пришел принимаемый сигнал. Метод определения битовой последовательности с помощью вектора диаграммы сигнального созвездия можно распространить и на другие виды цифровой модуляции, такие как QPSK, путем внесения незначительных изменений в программный код MATLAB, как показано в приложении.

Для расчета характеристик принятого сигнала требуется наличие общего опорного сигнала, как показано в левой части рисунка 2-4. Генератор SMW вырабатывает сигнал запуска для анализатора FSW. Требуемые кабельные соединения показаны в правой части рисунка 2-4.

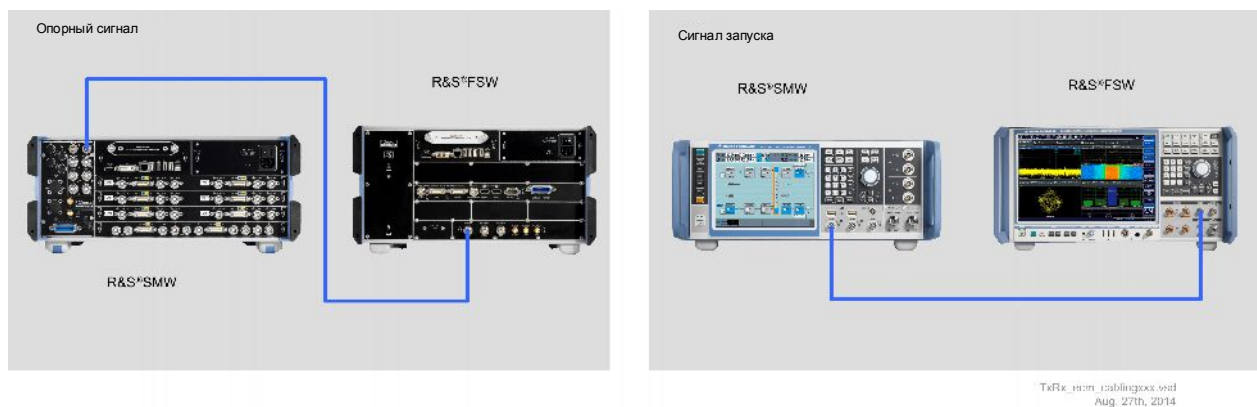


Рисунок 2-4 – Кабельные соединения для опорного сигнала и сигнала запуска

Помимо обратной связи в передатчике/приемнике, показанной на рисунке 2-2, в этом примере также рассматриваются вопросы обработки пользовательских импульсных сигналов. С помощью этой конфигурации в передающую систему может быть введена любая произвольная цифровая последовательность и, соответственно, получен произвольный модулирующий сигнал. Пример кода MATLAB, используемого для ввода цифрового сигнала в генератор модулирующего сигнала, приведен в приложении 5.1.3.

При проектировании таких систем следует учитывать требования к мощности, приведенные в главе 4 "Анализ требований к мощности сигнала". Сценарий мощностей "Military-Plane" (военный самолет) близок к ситуации, рассмотренной на рисунке 2-2.

В примере с активной преднамеренной помехой, рассматриваемом в этом пособии, полагается, что используется всего одна радиочастота. Однако современные РЛС используют режим скачкообразной перестройки частоты для минимизации помех, вызванных влиянием других систем или сигналов противника. В источнике [14] приводится подробная информация о расчете характеристик сигналов со скачкообразной перестройкой частоты.

2.3 Обнаружение и имитация движущихся объектов

Современные радиолокационные системы позволяют не только определять дальность до объекта, но и обеспечивают возможность измерения его радиальной скорости. Радиальная скорость и дальность до объекта являются ключевыми параметрами, особенно при использовании РЛС в автомобильной отрасли, например, для обнаружения пешеходов. Информация о дальности в РЛС может быть получена на основании временной задержки между переданным и принятым сигналами, тогда как радиальная скорость рассчитывается на основании сдвига частоты принятого сигнала относительно переданного сигнала – так называемого "доплеровского сдвига". На рисунке 2-5 показан расчет в среде MATLAB доплеровского сдвига при движении пешехода с радиальной скоростью 3 км/ч. При обнаружении пешехода с помощью переданного радиолокационного сигнала с частотой $f_{Xmt} = 2,45$ ГГц (S-диапазон) девиация частоты принятого сигнала составляет 13,62 Гц в зависимости от радиального направления движения пешехода. Если пешеход движется по направлению к антенне, частота увеличивается на 13,62 Гц, а при развороте и движении в обратном направлении доплеровский сдвиг будет отрицательным. В РЛС этот эффект используется для определения радиальной скорости объектов.

```
52 *
53 case{'human_movement'}
54 V_Tgt = 3.0; % speed of target in km/h
55 V_Tgt_1 = V_Tgt * 1000/3600; % speed of target in m/sec
56 f_Xmt = 2.45e9; % radar frequency in 1/sec
57
58 f_Rec = f_Xmt*(1+2*V_Tgt_1/c0);
59 f_Mix = f_Rec - f_Xmt;
60 y=sprintf('doppler frequency at mixer output [Hz] : %4.2f\n',f_Mix);
61 disp(y);
62 % result: 13.62 Hz
63
```

Рисунок 2-5 – Расчет доплеровского сдвига для движущихся объектов

На рисунке 2-6 показана испытательная установка, используемая для определения доплеровского сдвига. Выходной сигнал прибора SMBV распределяется по двум трактам, первый из которых ведет к передающей антенне, а второй – к входу гетеродина смесителя. Принятый сигнал поступает на ВЧ-вход смесителя. Выходной сигнал смесителя, отображаемый на экране осциллографа, представляет собой доплеровский сигнал, сдвиг частоты которого зависит от характера движения пешехода и рассчитывается, как показано на рисунке 2-5.

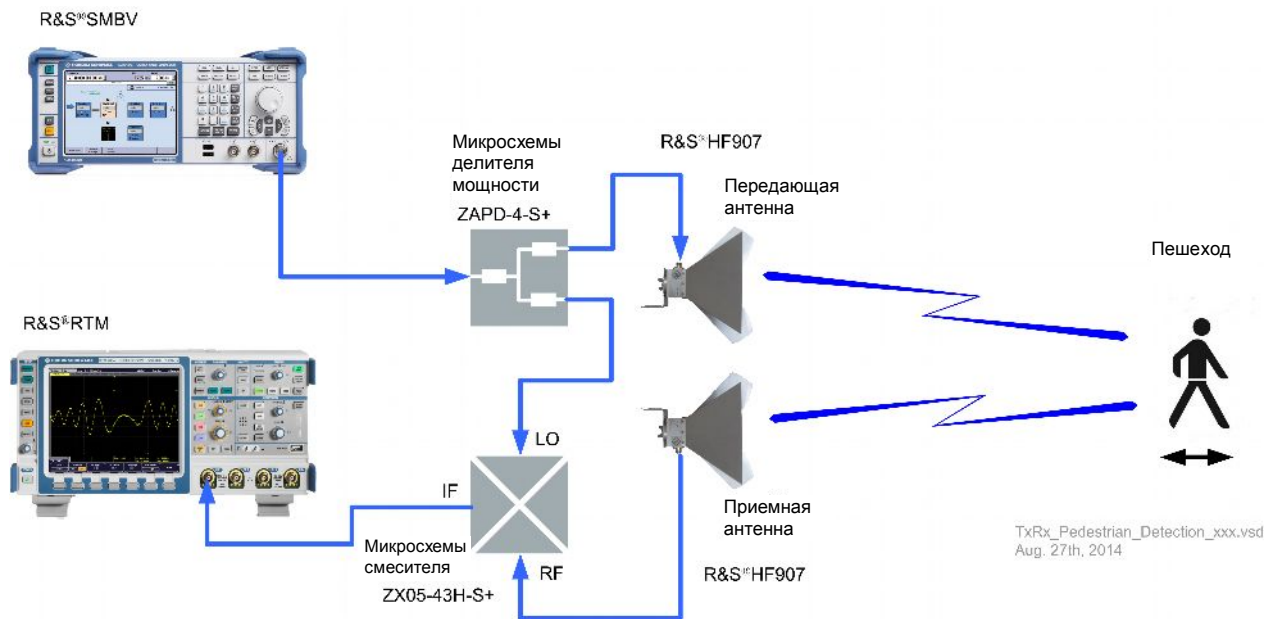


Рисунок 2-6 – Определение скорости движущихся объектов с помощью РЛС

Применение непрерывных сигналов позволяет использовать эту испытательную установку для измерений скорости. Результаты показаны на рисунке 2-7. Использование имеющейся в осциллографе функции измерения с помощью курсора позволяет проводить измерения частоты по одному периоду сигнала, см. отмеченное красным поле на рисунке 2-7. В случае постоянной радиальной скорости для определения частоты также может быть использована функция БПФ осциллографа.

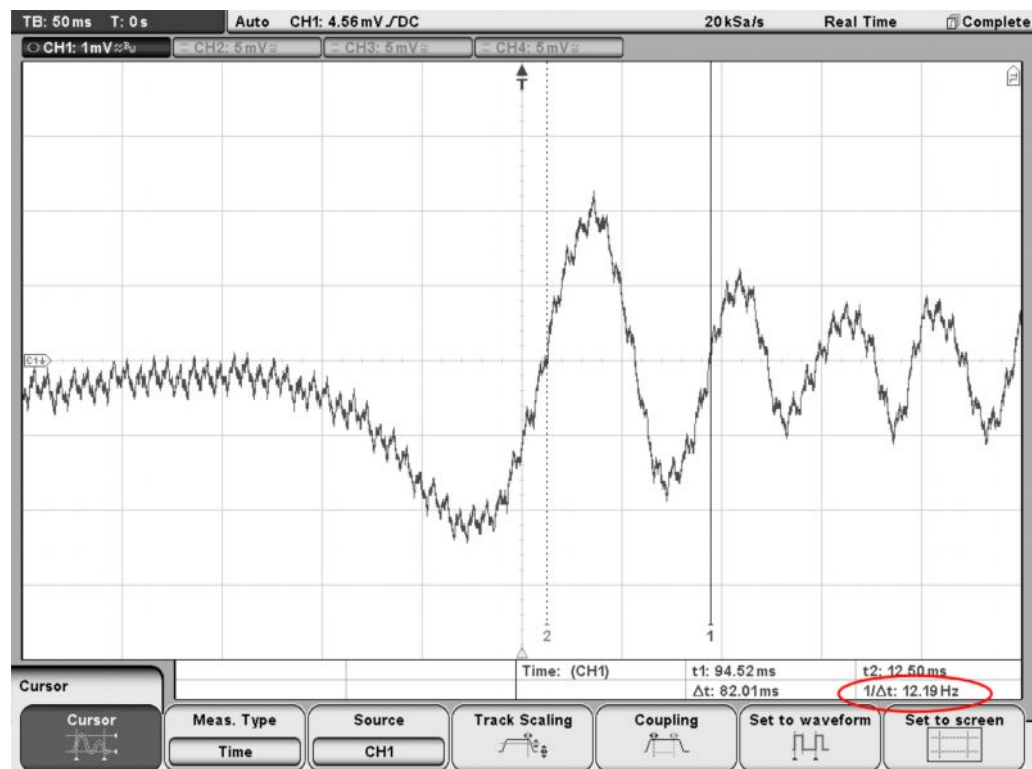


Рисунок 2-7 – Осциллограф для измерения выходной частоты смесителя

Обнаружение и имитация движущихся объектов

Прикладные программы MATLAB помогают в расчете скорости объекта, как показано на рисунке 2-8. В этом примере был получен результат 2,69 км/ч. Среда MATLAB обеспечивает возможность полного дистанционного управления всем приложением. В рассматриваемом случае расчет временных характеристик выполняется по половине периода выходного сигнала смесителя, в отличие от примера, приведенного на рисунке 2-7, где для удобства был использован полный период. Прикладные программы MATLAB также позволяют проводить расчет изменения скорости с течением времени и отображать ускорение на диаграмме. В этом примере использовался сигнал с частотой 2,45 ГГц. Работа на более высоких частотах, например 24 ГГц, обеспечивает более точные результаты измерений, поскольку доплеровский сдвиг при этом больше и его проще измерить. В приведенных на рисунке 2-5 формулах (см. строки 58 и 59) показана связь между радиочастотой и выходным сигналом смесителя.

```
64
65 case{'pedestrian'}
66
67 f_Mix = 12.2;      % frequency at mixer output in Hz
68
69 f_Xmt = 2.45e9;    % radar frequency in 1/sec
70
71 V_Tgt_1 = f_Mix * c0 / (2*f_Xmt);
72
73 y=sprintf('speed [m/sec] : %4.2f\n',V_Tgt_1);
74 disp(y);
75 % result: 0.75 m/sec
76
77 y=sprintf('speed [km/h] : %4.2f\n',3.6 * V_Tgt_1);
78 disp(y);
79 % result: 2.69 km/h
80
```

Рисунок 2-8 – Прикладная программа MATLAB для расчета скорости по частоте смесителя

В этом примере испытание проводилось в лабораторных условиях на дальностях 2-3 м и с использованием объектов, размеры которых не превышали 0,25 м². Для создания подобных систем для расположенных вне помещений приложений с реальными пешеходами необходимо также учитывать требования по мощности. Требования по мощности подробно рассмотрены в главе 4 "Анализ требований к мощности сигнала", где также приведены рекомендации в плане требований к усилителям, антеннам и размерам обнаруживаемых объектов.

При достижении вышеупомянутыми экспериментальными РЛС технических пределов в части радиальной скорости или дальности до объекта может быть использован другой метод, называемый "имитацией цели". Как показано на рисунке 2-9, проблема может быть решена с помощью стандартной опции имитатора замираний, доступной, например, для генераторов сигналов семейства SMW. Переданный сигнал может быть подвержен доплеровскому эффекту с помощью имитатора замираний, входящего в состав генератора сигналов. Это позволяет получить результирующий сигнал, подобный отраженному от движущегося объекта. На приемной стороне этот сигнал обнаруживается анализатором сигналов.

Среда MatLab: формирование ЛЧМ-импульсов

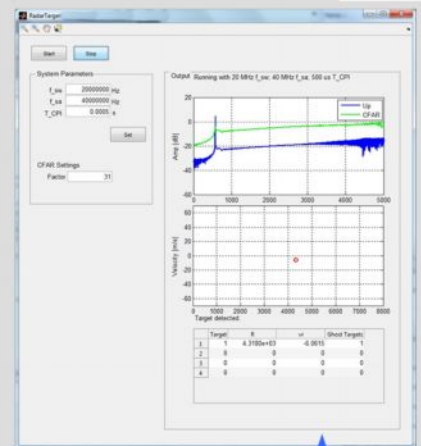
```

62 % setup frequency parameters :
63 f_sw = system.f_sw;
64 T_Chirp = system.T_Chirp;
65 f_sa = system.f_sa;
66
67 % calculate IQ-data from frequency parameters :
68 I_data_Up = cos(2*pi*(f_sw/(2*T_Chirp)*t).*(t));
69 Q_data_Up = sin(2*pi*(f_sw/(2*T_Chirp)*t).*(t));
70
71 I_data_Down = cos(2*pi*(-f_sw/(2*T_Chirp)*t).*(t));
72 Q_data_Down = sin(2*pi*(-f_sw/(2*T_Chirp)*t).*(t));
73
74 I_data_Dopp = cos(2*pi*((0.5*f_sw)/(2*T_Chirp)*t).*(t));
75 Q_data_Dopp = sin(2*pi*((0.5*f_sw)/(2*T_Chirp)*t).*(t));
76
77 IQInfo.I_data = [I_data_Up, I_data_Down, I_data_Dopp];
78 IQInfo.Q_data = [Q_data_Up, Q_data_Down, Q_data_Dopp];
79
80 % set marker2 to points of sweep change :
81 mark2_0 = 0;
82 mark2_1 = length(I_data_Up);
83 mark2_2 = length(I_data_Up)+length(I_data_Down);
84
85
86 IQInfo.comment = 'Linear UpDownDoppler'; % optional comment
87 IQInfo.copyright = 'Rohde&Schwarz'; % optional copyright
88 IQInfo.clock = f_sa; % sample rate
89 IQInfo.no_scaling = 0; % do not scale level

```

С помощью набора инструментов MathWorks Instrument Control Toolbox

ГИП MatLab: анализ ЛЧМ-импульсов



С помощью набора инструментов MathWorks Instrument Control Toolbox

Tx Имитатор замираний
R&S®SMW-B14

Table Settings		Copy Path Group
Unit	1	
Additional Delay /μs	μs	1.250 000
Resulting Delay /μs	μs	1.250 000
Power Ratio /dB		
Start Phase /Deg	Deg	0.0
Speed /kmh	kmh	450 000
Res. Dopp. Shift /Hz	Hz	1 021.54

R&S®SMW



ИУ

Rx



R&S®FSV

TxRx_fading_1000_vsd
Nov. 11th, 2014

Рисунок 2-9 – Опция замираний для моделирования дальности и скорости в РЛС (*)

Наряду с ситуацией, рассмотренной на рисунке 2-9, где имитация объекта выполнялась при дальности 4,3 км, в ряде случаев требуется имитация высокоскоростных объектов, движущихся на небольшом расстоянии от РЛС (около 200 м). Предположим, что имеется произвольный модулирующий сигнал, например, сформированный в среде MATLAB ЛЧМ-сигнал, для которого могут быть заданы задержка, например, 1,25 мкс, и скорость, например 450 км/ч. Оба этих параметра применяются к модулированному сигналу, который подается на выход прибора SMW.

На стороне ИУ сигнал представляется отраженным от объекта, находящегося на расстоянии 187 м и движущегося со скоростью 450 км/ч. Одними лишь средствами экспериментальной системы было бы сложно симитировать такой быстро движущийся объект на небольшом расстоянии от контрольно-измерительного оборудования. Основной принцип работы опций замираний генератора сигналов подробно описан в источнике [10]. Согласно спецификациям параметров замираний [15] максимальный сдвиг частоты составляет 4 000 Гц, что соответствует скорости объекта более 2 000 км/ч для несущей частоты РЛС 1 ГГц. Различные примеры расчетов, выполненных в среде MATLAB, приведены в файле "doppler_3.m" программ, которые приложены к настоящему пособию. При моделировании дальности соответствующая задержка может быть задана на значение до 0,5 с, что соответствует расстоянию более чем 75 000 км в обе стороны. Приращение дальности может быть очень малым благодаря малому шагу задания задержки. Таким образом, имитатор замираний может считаться широкодиапазонным инструментом моделирования в части скорости и дальности, пригодным для имитации движущихся кораблей и летательных аппаратов.

Обнаружение и имитация движущихся объектов

В этом примере используются ЛЧМ-сигналы, которые широко применяются для измерений скорости и дальности, выполняемых с помощью современных РЛС. Для получения подробной информации обратитесь к видео "Анализ непрерывных частотно-модулированных радиолокационных сигналов" [11].

При проектировании таких систем следует учитывать требования по мощности, приведенные в главе 4 "Анализ требований к мощности сигнала".

(*) Рекомендация: чтобы рассмотреть М-код, показанный в левой верхней части рисунка 2-9, выполните масштабирование PDF-документа. Полный код, используемый для формирования ЛЧМ-сигналов, доступен в приложении к настоящему учебному пособию.

3 Программное решение компании R&S для генерации радиолокационных сигналов

Как уже было сказано выше, современные радиолокационные приложения предъявляют высокие требования к параметрам блоков обработки сигналов. Для разработки и верификации РЛС представлен целый ряд программных библиотек моделей различных производителей. Программное решение компании R&S для генерации РЛС сигналов основано на моделях таких открытых сред, как MATLAB, C++ и VHDL. Целями разработки ПО для проведения испытаний РЛС компании R&S являлись независимость от поставщиков, низкий порог вхождения в части инвестиций и обучения персонала, а также простота внедрения в целевые системы, например бортовые устройства или среды заказчика, такие как производственные предприятия.

На рисунке 3-1 показана упрощенная блок-схема программного решения компании R&S для генерации радиолокационных сигналов. Снабжение генератора сигналов радиолокационным модулирующим сигналом, как правило, может быть выполнено двумя способами, что показано на диаграмме с помощью переключателя.

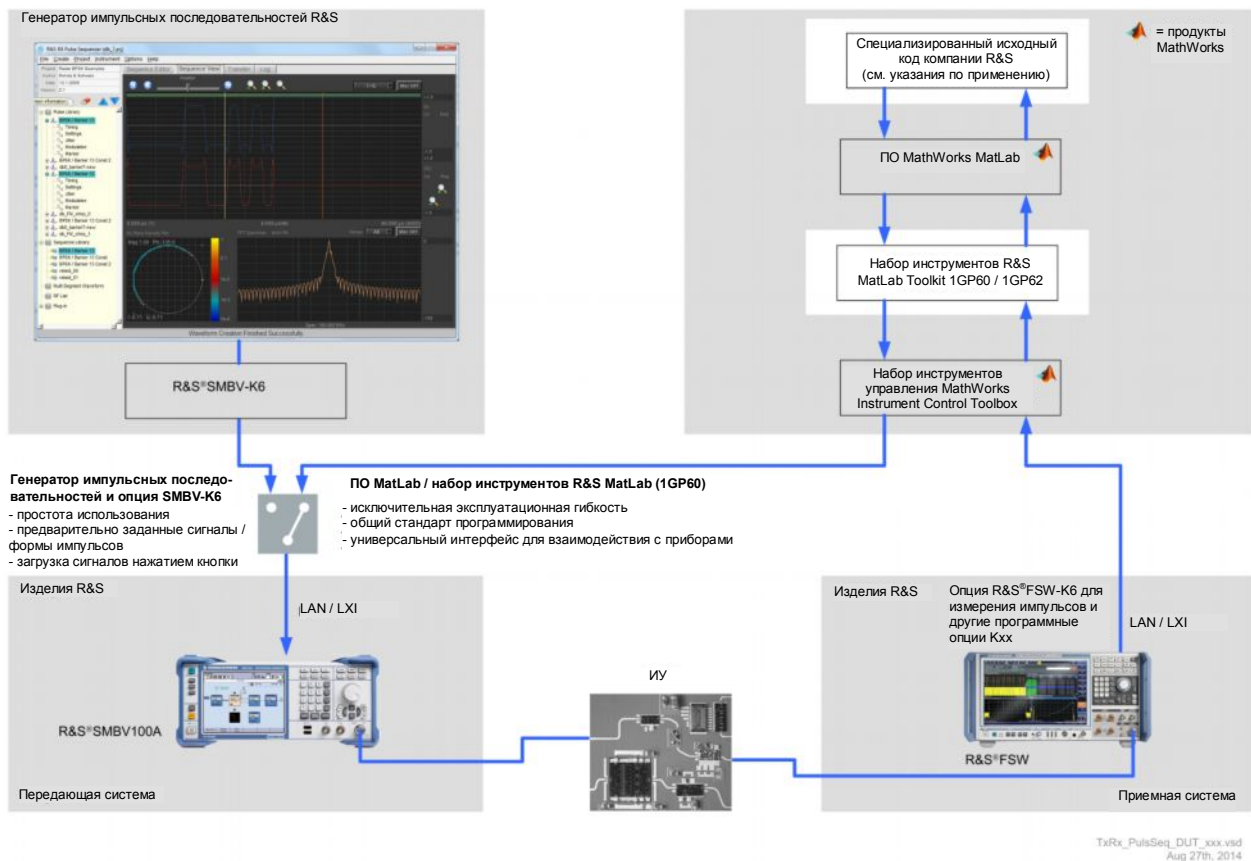


Рисунок 3-1 – Простота выбора в концепции программного обеспечения R&S для РЛС

Более подходящим методом, показанным в левой части рисунка, является применение ПО R&S для генерации импульсных последовательностей, которое может быть использовано для различных семейств генераторов сигналов R&S. Его можно бесплатно загрузить с домашней страницы R&S [12]. Бесплатное ПО можно использовать для выполнения пробных испытаний и для получения представления об интерфейсе пользователя. Кроме того, с его помощью можно проанализировать и отобразить содержимое файла итогового сигнала, как показано на рисунке 3-1. Для загрузки

ки итогового сигнала по LAN-интерфейсу в генераторе сигналов должна быть установлена опция SMBV-K6, использующая модулирующий РЛС сигнал. Генератор импульсных последовательностей содержит библиотеки импульсов и последовательностей, позволяющие получить полный набор стандартных модулирующих РЛС сигналов (коды Баркера с BPSK-модуляцией), многофазные коды (коды Фрэнка, P1, P2) или ЛЧМ-сигналы. После ввода параметров или выбора предварительно заданной последовательности импульсов и типа модуляции можно представить модулирующий сигнал в графическом виде (как на рисунке 3-1). С помощью ПО R&S для генерации импульсных последовательностей можно с легкостью задать так называемые "маркеры". "Маркерные" сигналы подаются на внешние разъемы генератора сигналов и могут быть использованы для запуска внешних устройств (анализатора сигналов или осциллографа). По завершении измерений и расчета характеристик сигнала он может быть загружен и воспроизведен нажатием кнопки, передающей соответствующие команды непосредственно по LAN-интерфейсу.

Другим способом расчета характеристик модулирующего сигнала является использование ПО MATLAB в сочетании с набором инструментов R&S MATLAB Toolkit, что показано с правой стороны переключателя на рисунке 3-1. Для бесплатного доступа к этому ПО см. документ 1GP60 [13]. Набор инструментов позволяет организовать универсальный и простой в использовании интерфейс между стандартным ПО MATLAB (обработка большого объема данных) и соответствующим прибором. Кроме того, с его помощью можно выполнить, например, расчет I/Q-данных трехступенчатого ЛЧМ-сигнала. С помощью универсального ПО MATLAB Toolkit рассчитанные I/Q-данные загружаются в прибор и непосредственно воспроизводятся с помощью маркеров запуска, предварительно определенных в среде MATLAB.

```

82 % setup R&S MATLAB Toolkit info structure
83 IQInfo.I_data      = [I_data_Up, I_data_Down, I_data_Dopp];
84 IQInfo.Q_data      = [Q_data_Up, Q_data_Down, Q_data_Dopp];
85
86 IQInfo.comment     = 'Linear UpDownDoppler'; % optional comment
87 IQInfo.copyright   = 'Rohde&Schwarz'; % optional copyright
88 IQInfo.clock       = f_sa; % sample rate
89 IQInfo.no_scaling  = 0; % do not scale level
90 IQInfo.filename    = 'RadarSignal.wv';
91 IQInfo.markerlist.one = [0 1];[200 0]; % marker signal 1
92 IQInfo.length = length(IQInfo.I_data);
93
94 IQInfo.markerlist.two = [mark2_0 1];[mark2_0+200 0]; ...
95 [mark2_1 1];[mark2_1+200 0];[mark2_2 1];[mark2_2+200 0];
96
97 % Connect to SMBV
98 deviceIdentSMBV = '10.85.0.69';
99 [statusSMBV,handles.deviceObjSMBV] = rs_connect('tcpip', deviceIdentSMBV);
100
101 % generate and send waveform
102 statusSMBV = rs_generate_wave(handles.deviceObjSMBV, IQInfo, 1, 0);

```

Подготовка I/Q-данных на основании предварительно рассчитанных данных MatLab

Настройка общих административных данных и ввод информации о маркерах

Инициализация LAN-соединения и отправка полного набора данных в прибор, запуск воспроизведения сигнала

Рисунок 3-2 – Загрузка сигнала в прибор с помощью набора инструментов R&S MATLAB

На рис. 3-2 показана простая настройка трехступенчатого ЧМ-сигнала для загрузки в прибор SMBV. В строках 83/84 выполняется подготовка I/Q-данных, полученных из ранее выполненного программного кода MATLAB, а в строках 86-95 – настройка административных данных. В строках 97-102 данные, наконец, передаются в прибор, и начинается непосредственное воспроизведение сигнала. В коде MATLAB, приложенном к настоящему учебному пособию, содержатся все необходимые программные строки. Помимо генерации произвольных сигналов ПО позволяет использовать команды программного управления приборами ("rs_send_command" и "rs_send_query"). Обе команды могут применяться для управления как генераторами сигналов, так и другими приборами. Команды могут быть использованы, например, для дистанционного управления анализаторами семейств FSV или FSW, как показано в правой нижней части рис. 3-1. Использование такого стандартного ПО, как MATLAB, для обработки РЛС-сигналов имеет ряд преимуществ по сравнению со специализированными программными инструментами. В литературе по радиолокации многие примеры обработки сигналов реализованы в программном коде MATLAB, для простоты называемом также "m" кодом. В [8] представлен полный набор примеров использования исходного кода MATLAB для радиолокационных приложений.

4 Анализ требований к мощности сигнала

В данной главе рассматриваются вопросы, связанные с требованиями по мощности, которые необходимо учитывать при проектировании радиолокационных систем на базе контрольно-измерительных приборов. Требования по мощности также обсуждаются в [5] и [6]. Представленное обучающее видео [9] знакомит пользователя с основным уравнением радиолокации, которое играет ключевую роль при расчетах мощностных характеристик, как показано в этой главе. В приложении 5.1.2 с помощью небольшой программы MATLAB выполняется расчет мощности приема для ряда практических сценариев. Во всех рассматриваемых примерах считается, что согласование импедансов выполнено наилучшим образом, а потери на отражение незначительны.

Помимо коэффициента усиления антенны при проектировании радиолокационных систем необходимо учитывать еще два основных параметра. Первым является размер обнаруживаемого объекта, а вторым – дальность до цели. Размеры отражающих объектов описываются параметром «эффективная площадь рассеяния» (ЭПР; англ. *Radar Cross-Section, RCS*). Этот параметр исчисляется в квадратных метрах (m^2), а его значение зависит от формы, материала, частоты и угла зрения. В приведенной ниже таблице приведены некоторые значения ЭПР [1], соответствующие диапазону СВЧ (*):



Объект	σ (m^2)
Птица	0,01
Реактивный снаряд	0,5
Человек	1,0
Небольшой самолет	1 – 2
Велосипед	2
Малый катер	2
Истребитель	3 – 8
Бомбардировщик	30 – 40
Большой самолет	100
Грузовой автомобиль	200

rsc_1_vsd
July 28th, 2014

Рисунок 4-1 – Объекты моделирования и типовые значения их эффективной площади рассеяния (ЭПР) [1]

(*) Эти значения позволяют получить общее представление о величинах ЭПР. Как правило, значения ЭПР приводятся с указанием условий их определения, а именно частотой, углом зрения и типом окружающей обстановки (море/воздух).

На рисунке 4-2 дано визуальное представление типовых значений ЭПР для диапазона СВЧ.



Рисунок 4-2 – Сравнение типовых значений эффективной площади рассеивания (ЭПР)

Значения ЭПР, приведенные на рисунке 4-1, могут быть использованы в качестве оценочных для различных обнаруживаемых РЛС объектов. Например, при использовании усилителя мощности R&S BBA150 можно получить выходную мощность 56 дБмВт. На рисунке 4-3 показан соответствующий пример экспериментальной РЛС.

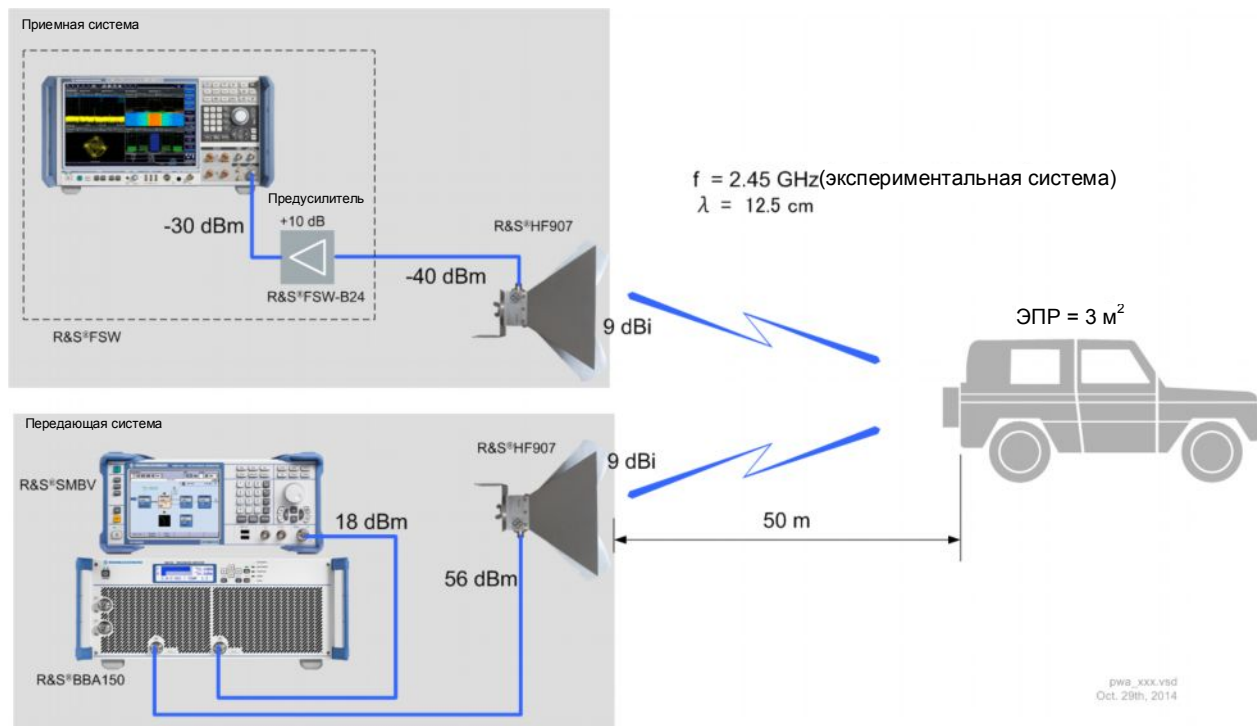


Рисунок 4-3 – Значения мощности в типовой экспериментальной РЛС

Для рупорной антенны R&S HF907 коэффициент усиления на частоте 2,4 ГГц составляет 9 дБи. В случае с обнаружением автомобиля класса SUV (ЭПР = 3 м^2) на расстоянии 50 м ожидаемое значение мощности приема составит -40 дБмВт. При проектировании передающих систем также необходимо учитывать требования к максимальной подводимой к антенне мощности (см. рисунок 4-3). Значение PEP (пиковая мощность огибающей) для подводимой мощности антенны R&S HF907 составляет 57 дБмВт, поэтому данная антенна может быть использована для указанных целей.

При расчете параметров мощности в рамках полной системы необходимо также учитывать характеристики приема. Значение чувствительности по запуску прибора FSW составляет -60 дБмВт [19]. Чувствительность при приеме прибора FSW может быть улучшена с помощью предусилителя (опция FSW-B24), позволяющего повысить эффективную чувствительность по запуску как минимум на 10 дБ. На рисунке 2-7 показаны уровни сигнала на входе приемника для различных радиолокационных сценариев. Чувствительность по запуску для прибора FSW в стандартной конфигурации отмечена синей пунктирной линией. При установленной опции предусилителя FSW-B24 значение чувствительности повышается на 10 дБ и указывается красной пунктирной линией. Метки в виде черных ромбов показывают уровни сигнала на входе приемника для следующих радиолокационных сценариев:

- сценарий "Pozar" на основании данных, полученных в [1], стр. 662, при мощности импульса сигнала 63 дБмВт (2 кВт) и с использованием антенны с высоким коэффициентом усиления 28 дБи позволяет идентифицировать объект на дальности свыше 8 000 м с эффективной площадью рассеивания 12 м^2 , т.е. как у самолета среднего размера. Рассчитанная мощность в приемной антенне составляет -90 дБмВт. В этом сценарии РЛС работает на частоте 10 ГГц в X-диапазоне, тогда как в последующих сценариях используется частота 2,45 ГГц и S-диапазон.

- сценарий "SUV_no_amp", использующий генератор сигналов SMBV (18 дБмВт), который непосредственно подключен к рупорной антенне R&S HF907 (9 дБи), позволяет обнаруживать автомобили класса SUV (ЭПР = 3 м^2) на расстоянии 50 м. Этот пример аналогичен случаю, рассмотренному на рисунке 4-3, за тем лишь исключением, что усилитель мощности BBA150 здесь заменен короткозамкнутой перемычкой. Уровень результирующей мощности приема составляет -78 дБмВт.

- сценарий "MilitaryPlane", использующий усилитель мощности BBA150, 56 дБмВт, 400 Вт, который подключен к антенне HF907, позволяет обнаруживать большие самолеты ($\text{ЭПР} = 60 \text{ м}^2$) на расстоянии всего 500 м. Уровень мощности приема при этом составляет -67 дБмВт, а сам сценарий может быть запущен внутренними средствами при наличии опции FSW-B24.

- сценарий "Lab_Cond_no_amp", использующий прибор SMBV, 18 дБмВт, непосредственно подключенный к рупорной антенне HF907, 9 дБи, позволяет обнаруживать небольшие объекты (см. рисунок 2-2), находящиеся на расстоянии 8 м. Уровень мощности приема при этом составляет -54 дБмВт, а сам сценарий может быть запущен внутренними средствами даже без установленной опции FSW-B24. Сценарий "Laboratory condition" (лабораторные условия) может быть реализован в небольших помещениях, однако при этом нужно учитывать наличие мешающих отражений от других объектов, таких как стены или оборудование. Поддержание невысокого уровня мешающих отражений возможно в случае работы вне помещений или при фокусировке антенн с высоким коэффициентом усиления на целевом объекте.

- сценарий "SUV_with_amp" показан на рисунке 4-3, при этом коэффициент усиления антенны в режиме приема равен -40 дБмВт.

- сценарий "Lab_Cond_with_amp" аналогичен "Lab_Cond_no_amp", но использует 56 дБмВт усилитель мощности BBA150, при этом мощность приема равна -23 дБмВт. Этот пример показывает, как создавать экспериментальные РЛС непосредственно в лабораторных условиях.

Расчеты уровней сигнала на входе приемника выполняются с помощью небольшой программы MATLAB (см. приложение 5.1.2). Эта программа может быть использована для проведения дополнительных расчетов мощности и позволяет получить подробную информацию о различных радиолокационных сценариях, описанных в настоящем пособии.

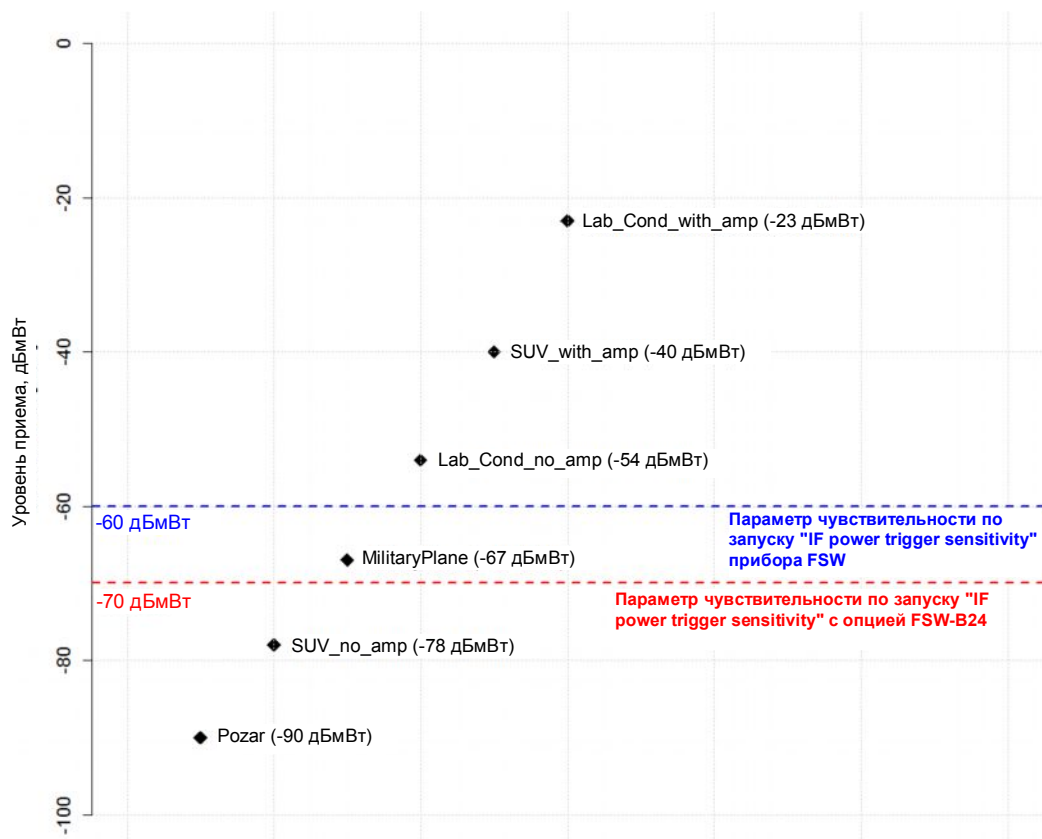


Рисунок 4-4 – Обзор уровней сигнала на входе для различных радиолокационных сценариев (стандартные радиолокационные диапазоны)

Для всех сценариев, находящихся выше пунктирных линий, могут быть получены приемлемые результаты. Для сценариев, находящихся ниже пунктирных линий, необходимо применение дополнительных мер, таких как повышение импульсной мощности усилителя передатчика или увеличение коэффициента усиления антенны, например, путем использования небольших рупорных антенн, как показано на рисунке 4-5. В отличие от широкополосной антенны HF907 характеристики рупорной антенны, показанной на рисунке 4-5, определяются в рамках выделенной полосы частот, но при этом такая антенна обеспечивает усиление более чем на 20 дБи.

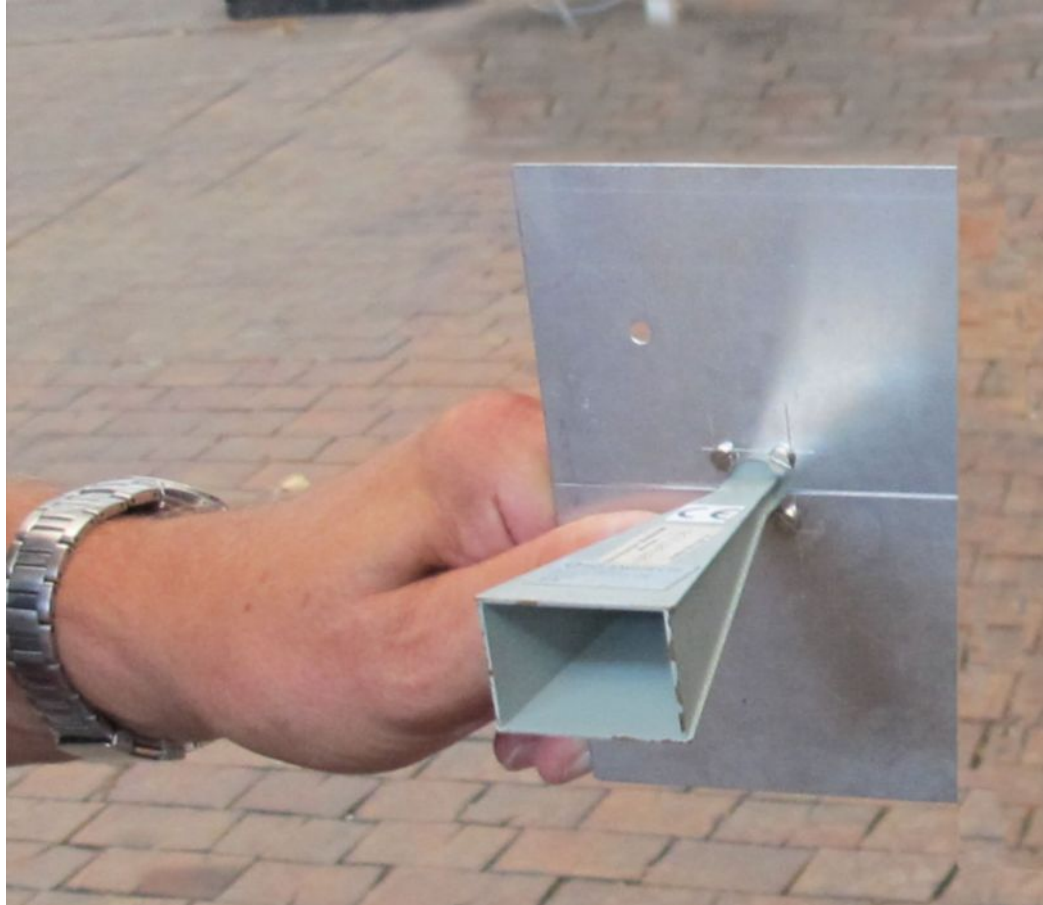


Рисунок 4-5 – Небольшая рупорная антенна, обеспечивающая усиление более чем на 20 дБи

Кроме того, для активных РЛС, где передатчик и приемник расположены близко друг у другу, может быть использована функция внешнего запуска прибора FSW. Это возможно, если передающий прибор SMBV и принимающий прибор FSW расположены близко друг к другу, что является обычной практикой в случае активных РЛС. Для пассивных РЛС [6], где передатчик и приемник могут находиться на больших расстояниях друг от друга, возможны два варианта:

- (1) Необходимость использования эталонной системы единого времени для учета двусторонней задержки радиолокационного сигнала. В этом случае приемник и передатчик должны синхронизироваться с помощью системы GPS;
- (2) Отсутствие необходимости в использовании эталонной системы единого времени, например при проведении чисто доплеровских измерений. В этом случае приемная система, т.е. анализатор спектра/сигналов, может быть запущена непосредственно принятым сигналом. При этом рекомендуется использовать опцию предусилителя FSW-B24.

Оборудование, задействованное в вышеприведенных примерах, подходит для использования в лабораторных условиях или проведения испытаний на небольших

площадках, что продемонстрировано, например, в сценариях "SUV". Усилитель ВВА150 обеспечивает уровень мощности 56 дБмВт (400 Вт) и, как следствие, может использоваться для проведения испытаний на расстояниях до нескольких километров в сочетании с высокочувствительными блоками обработки сигналов. Тем не менее, если условия эксперимента выходят за указанные рамки, например при дальности до нескольких сотен километров, необходимо использовать более мощные усилители для компенсации затуханий на трассе. На рисунке 4-6 показано типовое серийное устройство для морского применения и приведены требования по мощности для реальных РЛС.



Рисунок 4-6 – Серийное устройство для морского применения (выделены импульсная мощность и максимальная дальность)

Из технических данных видно, что для компенсации затухания на трассе на расстоянии 60 км требуется уровень импульсной мощности 64 дБмВт без учета эффективной площади рассеивания. Эти данные наиболее характерны для больших кораблей со значениями ЭПР более 30 м².

5 Приложение

5.1 Программы в среде MATLAB

В данном приложении приводится более подробное описание набора MATLAB-программ, нежели содержащееся в исходных программных файлах. Исходные файлы содержат номера строк для удобства приведенного в настоящем документе описания. По этой причине получить исходный код из данного документа невозможно. Тем не менее, исходные коды предоставляются в качестве приложения к данному учебному пособию, см. [16].

5.1.1 Взаимная корреляция с использованием кодов Баркера

Данная программа имитирует передачу и прием сигнала с кодом Баркера. Принимаемый сигнал соотносится с передаваемым с целью определения времени задержки между моментами передачи и приема. Программа показана на рисунках 5-1 и 5-2.

```

1  % *** testing cross correlation using barker codes ***
2  % file: BarkerSimulation_1.m
3  % update: Oct 24th, 2014
4
5  % Function needed in MatLab in extra file 'crossm.m':
6
7  %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
8  % function [Rxy]=crossm(x,y)
9  % % This function Estimates the crosscorrelation of the sequence x and y
10 % N=length(x);
11 % Rxy=zeros(1,N);
12 % for m=1: N+1
13 |     % for n=1: N-m+1
14 |     % Rxy(m)=Rxy(m)+x(n)*y(n+m-1);
15 |     % end;
16 % end;
17 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
18
19 clear;
20
21 N=200; % Number of samples to generate
22 delay_tx_rx=50;
23
24 noise_amplitude=0;
25 %noise_amplitude=2;
26
27 line_attenuation=50; % Tx/Rx line attenuation [dB]
28
29 x=zeros(1,N);
30 %barker=[1,1,1,0,0,1,0]; % 7 bit barker code
31 %barker=[1,1,1,0,0,0,1,0,0,1,0]; % 11 bit barker code
32 barker=[1,1,1,1,1,0,0,1,1,0,1,0,1]; % 13 bit barker code
33

```

Рисунок 5-1 – Взаимная корреляция с использованием кодов Баркера (часть 1 из 2)

Программы в среде MATLAB

Строки 8-16 обеспечивают замену функции взаимной корреляции, которая в среде MATLAB обычно доступна только вместе с набором инструментов для обработки сигналов Signal Processing Toolbox. Для того чтобы запустить программу в стандартной среде MATLAB без дополнительных наборов инструментов, строки 8-16 необходимо сохранить в дополнительном файле "crossm.m".

```

34 x(1:length(barker))=5*barker;
35 subplot(3,1,1);
36 stairs(x);
37 title('Transmitted signal');
38 ylim([0,7]);
39 xlabel(' [usec] ');
40 ylabel(' [dB] ');
41 grid();
42
43 xd=zeros(1,delay_tx_rx), x(1:N-delay_tx_rx)]; % signal delay
44 xd=0.7*xd(1:N); % signal attenuation
45
46 w=noise_amplitude*randn(1,N); % create noise signal
47
48 r=xd+w; % create the sum signal
49 subplot(3,1,2);
50 plot(r-50);
51 title('Received signal');
52 xlabel(' [usec] ');
53 ylim([-60,-40]);
54 ylabel(' [dB] ');
55 grid();
56
57 Rxy=crossm(x,r); % Estimate the cross correlation
58 Rxy=Rxy/max(Rxy);
59 subplot(3,1,3);
60 plot(Rxy);
61 title('Cross correlation transmit receive');
62 xlabel(' [usec] ');
63 ylim([0,1]);
64 grid;
65
66 disp('maximum found at sample : ');
67 disp(find(Rxy==max(Rxy)));

```

Рисунок 5-1 – Взаимная корреляция с использованием кодов Баркера (часть 2 из 2)

Соответствующая функция MATLAB "crossm" вызывается в строке 57 главной программы. Строки 29-34 служат для создания и построения передаваемого сигнала. Строки 34-41 имитируют прием с затуханием (строка 44) и шумом (46). Взаимная корреляция окончательно рассчитывается и строится в строках 57-64. Наконец определяется и выводится на печать максимум (строки 66, 67). Рисунок 1-2 в этом документе был создан при помощи данного программного кода MATLAB. Форма кривой меняется от вызова к вызову из-за шума функции приема (строка 46).

В целях реализации этого метода с помощью приборов в данном примере приведены основные рекомендации по реализации соответствующей системы, например, согласно рисунку 1-1. До строки 41 вычисляется модулирующий сигнал для генератора сигналов (например, SMBV), где он подвергается BPSK-модуляции и выводится на передатчик. После приема отраженного сигнала он демодулируется, например, в FSW и FSW-B7, а затем сохраняется в вектор «г». Наконец, он подвергается постобработке в соответствии со строками 57-67, что дает временную задержку и, следовательно, расстояние до объекта, обнаруженного РЛС. Поскольку строки 43-55 служат для имитации тракта приема/передачи, данный раздел

Программы в среде MATLAB

программного кода больше не используется при реализации системы с помощью приборов по аналогии с рисунком 1-1.

Глава 5.1.3 данного учебного пособия содержит полный пример MATLAB-программы, показывающий способ выполнения модуляции и демодуляции сигналов, и в том числе, программирования прибора.

Функция взаимной корреляции (см. рисунок 5-1, строки 8-16) обеспечивает работу простого метода, функционирующего во временной области, для демонстрации принципа сжатия импульсов. Существует еще один способ, описанный в литературе (например [8], стр. 299) с использованием "корреляционного процессора", опирающегося на вычисления в частотной области. Данный метод выполняет БПФ обоих входных сигналов, а затем выполняет обратное преобразование умноженного сигнала во временную область с помощью обратного быстрого преобразования Фурье (ОБПФ). Это может быть важно при реализации систем сжатия импульсов. Тем не менее, техническая оценка с подробным сравнением достоинств и недостатков обоих методов выходит за рамки настоящего документа.

5.1.2 Сценарии расчета импульсной мощности

Различные сценарии расчета мощности из главы 4 были выполнены с помощью программы MATLAB, выдержки из которой показаны на рисунках 5-3 и 5-4. Один из шести сценариев полностью показан на рисунке 5-4. На рисунке 5-3 показан заголовок программы, в которой выбирается конкретный сценарий. Рассчитываемый сценарий выбирается в строках 15-20 путем раскомментирования соответствующей строки. В данном случае активным является сценарий "SUV_with_amp".

```

1  % *** Received power for various scenarios ***
2  % file: RadEqu_1.m
3  % update: August 5th, 2014
4
5  % Some experiments along with the Radar Equation,
6  % reference: Pozar, [1], p. 662
7
8  clc;
9  clear;
10 c0 = 2.998e8;      % speed of light
11
12 %% activate one of the following scenarios ...
13 %% ... in order to perform appropriate power ...
14 %% ... calculations :
15 %scenario='MilitaryPlane';      % -67 dBm
16 scenario='SUV_with_amp';        % -40 dBm
17 %scenario='SUV_no_amp';          % -78 dBm
18 %scenario='Lab_Cond_with_amp';   % -23 dBm
19 %scenario='Lab_Cond_no_amp';     % -54 dBm
20 %scenario='Pozar'                % -90 dBm
21
22 disp(scenario);
23

```

Рисунок 5-3 – Выдержка из сценариев расчета мощности (часть 1 из 2)

Программы в среде MATLAB

Данный сценарий вычисляется в строках 51-69. В строках 51-65 выполняется настройка всех параметров в соответствии со сценарием. Уравнение радиолокации закодировано в строке 67. Строка 69 используется для вывода результата на консоль, потому что точка с запятой в конце строки *отсутствует*. Полная программа, содержащая все шесть сценариев, содержится в [16].

```

49 case{ 'SUV_with_amp' }
50
51     pow_BBA150 = 56;           % 1 dB compression point power 400 W = 56 dBm
52     gain_HF907 = 9;           % gain of R&S antenna type HF907 at 2.4 GHz
53
54     Pt=pow_BBA150;           % power in dBm
55     Ptw = 10^(Pt/10);
56
57     G=gain_HF907;           % gain of transmit antenna in dBi
58     G1=10^(G/10);           % linear gain
59
60     f=2.4e9;                 % frequency in Hz
61     la=c0/f;                 % wavelength in m
62
63     sigma=3;                 % SUV car radar cross section in m^2
64
65     R=50;                     % distance in m
66
67     Pr=Ptw*G1^2*la^2*sigma/((4*pi)^3*R^4); % received power in Watts
68
69     Prlog=10*log10(Pr)       % received power in dBm
70
71 end % end switch
72

```

Рисунок 5-4 – Выдержка из сценариев расчета мощности (часть 2 из 2)

Дальнейшие сценарии могут быть добавлены простым копированием дополнительных пунктов 'case' в рамках конструкции switch/end, как показано на рисунке.

5.1.3 РЛС с обратной связью

В соответствии с главой 2.2 в программе реализован простой контур из передатчика, испытательного тракта / испытательного устройства и приемника. В особых случаях принятый и демодулированный сигнал может быть использован в качестве основы для модуляции с целью последующей передачи либо в оригинальном виде, либо в виде с преднамеренными помехами. На рисунке 5-5 показана основная часть соответствующего программного кода MATLAB. Помимо основной части программы, необходимы четыре дополнительные функции MATLAB, вызываемые в строках 32, 36, 41 и 46. В данной главе приведено описание основной части и функции "Setup_SMx". Весь пакет программ доступен вместе с настоящим учебным пособием и может быть загружен через интернет [16]. Как показано на рисунке 2-2, для управления приборами в трактах приема и передачи необходима одна лицензия на набор инструментов для управления приборами из MATLAB (Instrument Control Toolbox). После монтажа системы в соответствии с рисунками 2-2 и 2-4 возможен непосредственный запуск программы и получение результатов, похожих на результаты с рисунка 2-3.

Строки 11-16 основной части программы содержат идентификаторы дистанционного управления различных приборов, с помощью которых тестировалось программное обеспечение. Строки 20-23 определяют три глобальных параметра, которые используются во всей программе, включая функции. С помощью параметров могут быть глобально заданы рабочая частота и уровень передачи генератора. Строка 27 определяет битовый шаблон для BPSK-модуляции передаваемого и принимаемого сигнала. Функция "Get_Bits" используется для демодуляции. Передаваемая битовая

последовательность вместе с принимаемой последовательностью показаны на рисунке 2-3.

```

1  %% Main program of closed loop radar application
2  % To be used to record and playback radar signals.
3  % The functions can be used separately
4
5  %% EXTERNAL REFERENCE =====
6  % External reference needs to be supplied to FSx in order to perform
7  % IQ measurement without tracking the signal.
8  % make sure to connect SMBV's reference output to FSx input
9  %% =====
10
11 %smbvID = 'smbv100a258082';
12 %smbvID = 'rssmw200a101101';
13 %smxID = 'smbv100a258082';
14 %smxID = 'rssmu200a100951';
15 %fsxID = 'fsv7-102622';
16 %fsxID = 'fsvr7-100842';
17
18 fileName = 'rRecord.csv';
19
20 global settings;
21 settings.frequency = '2.45GHz';
22 settings.level = '-30dBm';
23 settings.numPoints = 1000; % needs to be a multiple of 100.
24
25
26 % if data is recorded, predefined pattern will be overwritten
27 pattern = [0 0 0 0 0 1 1 0 0 1 0 1 0];
28

```

Рисунок 5-5 – Основная программа РЛС с обратной связью (часть 1 из 2)

```

28
29 %% play the extracted pattern using an SMBV
30 % smbvID   Hostname or IP adress of signal generator
31 % pattern  pattern to be PSK modulated on RF
32 Setup_SMx(smxID, pattern);
33
34 %% setup analogue Phase demod measurement with R&S spectrum analyzer
35 % fsxID    Hostname or IP adress of spectrum analyzer
36 Setup_FSx(fsxID);
37
38 %% record data using FSx
39 % fsxID    Hostname or IP adress of specrum analyzer
40 % fileName select a '.dat' file to analyze
41 TraceFile(fsxID, fileName);
42
43 %% extract bit pattern from recorded data
44 % fsxID    Hostname or IP adress of specrum analyzer
45 % fileName select a '.dat' file to analyze
46 pattern = Get_Bits(fsxID, fileName, pattern);
47

```

Рисунок 5-6 – Основная программа РЛС с обратной связью (часть 2 из 2)

Строки 29-46 содержат вызовы четырех функций, которые подробно описаны ниже.

5.1.3.1 Функция Setup_SMx

Данная функция обеспечивает настройку передающего устройства. Были протестированы различные типы генераторов R&S, например, из семейств SMW и SMBV. На рисунках 5-7 и 5-8 приведен полный листинг MATLAB-кода функции.

```

1 function Setup_SMx( smxID, pattern)
2 %% Plays a pattern on the Signal Generator (SigGen)
3 % copy 64 bits to the SigGen, apply 2PSK modulation. Frequency and level are
4 % defined in a global variable settings.
5 % settings.frequency = '2.45GHz';
6 % settings.level = '-10dBm';
7 %
8 % exemplary use: playFile([1 0 0 0 1 0 0 1 1 1 0], 'smbv100a259234')
9 global settings;
10
11 if length(pattern) > 64
12     pattern = pattern(1:64);
13 end
14 % create a pattern string containing only 1 and 0
15 pattern = mat2str(pattern);
16 pattern = pattern(pattern=='0' | pattern=='1');
17
18 % Initialize a waitingbar
19 h = waitbar(0.1, ['Setting up ' smxID]);
20
21 [~, deviceObj] = rs_connect('tcpip', smxID);
22 rs_send_command(deviceObj, 'SOURCE:BB:DM:PRESet'); % Preset Baseband
23 rs_send_query(deviceObj, '*OPC?');
24 waitbar(0.3, h);
25

```

Рисунок 5-7 – Настройка генератора для РЛС с обратной связью (часть 1 из 2)

Программы в среде MATLAB

В строках 26 и 27 показана настройка частоты и мощности генератора в соответствии с допустимыми глобальными переменными, заданными в главной программе. Программирование прибора в среде MATLAB посредством команд "rs_send_command" и "rs_send_query" является типичным для прибора с набором инструментов "MATLAB Toolkit" в соответствии с рисунком 3-1. Набор инструментов MATLAB Toolkit подробно описан в [13].

```

26 rs_send_command(deviceObj, ['SOURCE:FREQUENCY ' settings.frequency]); % set frequency
27 rs_send_command(deviceObj, ['SOURCE:POW ' settings.level]); % set level
28
29 rs_send_command(deviceObj, 'SOURCE:BB:DM:CODING OFF'); % Coding OFF
30 rs_send_command(deviceObj, 'SOURCE:BB:DM:FORMAT BPSK'); % BPSK modulation
31
32 rs_send_command(deviceObj, 'SOURCE:BB:DM:SOURCE PATTERN'); % Data Source is pattern
33 rs_send_command(deviceObj, ['SOURCE:BB:DM:PATTERN #B' ... % copying pattern to SMBV
34 , pattern, ' ' num2str(length(pattern))]);
35 rs_send_command(deviceObj, 'SOURCE:BB:DM:FILTER TYPE RECT'); % rectangular pulse shaping
36
37 rs_send_command(deviceObj, 'BB:DM:TRIG:OUTP1:MODE PATT'); % Create Marker 1 Output for FSx
38 rs_send_command(deviceObj, ...
39 ['BB:DM:TRIG:OUTP1:PATT #B00000000000001,13']);
40
41 rs_send_command(deviceObj, 'BB:DM:TRIG:OUTP2:MODE PATT'); % Create Marker 2 Output for FSx
42 rs_send_command(deviceObj, ...
43 ['BB:DM:TRIG:OUTP2:PATT #B00000000000001,13']);
44
45 waitbar(0.7, h);
46 rs_send_command(deviceObj, 'SOURCE:BB:DM:STATE ON'); % switch BB signal ON
47
48 rs_send_command(deviceObj, 'OUTPUT ON'); % switch RF signal ON
49 rs_send_query(deviceObj, '*OPC?');
50 clear deviceObj;
51 close(h);
52 end

```

Рисунок 5-8 – Настройка генератора для РЛС с обратной связью (часть 2 из 2)

В строках 26-49 светло-серым цветом показаны SCPI команды, передаваемые в прибор. Они описаны в его руководстве по эксплуатации. Строки 37-44 служат для программирования маркерных выходов, реализованных на выходных разъемах "User1" и "User2". На оба выхода выводится один и тот же сигнал: один предназначен для запуска тестового приемника, а другой может быть использован для запуска осциллографа и наблюдения модулирующих IQ- сигналов генератора.

5.1.3.2 Функция Setup_FSx

Сторона приемника программируется похожим образом с помощью набора инструментов MATLAB Toolkit [13]. На рисунках 5-9 и 5-10 показан полный листинг программного кода MATLAB.

```

1 function Setup_FSx( fsxID)
2 %% Setup_FSx is used to handle a R&S spectrum analyzer
3 % for the radar closed loop application
4 % The function needs the Hostname of the spectrum analyzer as input
5 % parameter. FSx will be setup to analog Phasedemodulation.
6 %
7 % exemplary usage:
8 % recordData('rsfsq26100026', 'RadarRecord.csv');
9
10 global settings;
11
12 h = waitbar(0.1, ['Setting up ' fsxID]); % open waitbar
13
14 %% instrument setup
15 [~, deviceObj] = rs_connect('tcpip', fsxID);
16 rs_send_command(deviceObj, 'PRES'); % preset baseband
17 rs_send_query(deviceObj, '*OPC?');
18 waitbar(0.5, h);
19
20 rs_send_command(deviceObj, 'SYST:DISP:UPD ON'); % Turn the display ON
21
22 rs_send_command(deviceObj, ['FREQ:CENT ' settings.frequency]); % set center frequency
23 rs_send_command(deviceObj, ['DISP:TRACE:Y:RLEVEL ' settings.level]); % set reference level
24 rs_send_command(deviceObj, 'FREQ:SPAN 0Hz'); % zero span
25 rs_send_command(deviceObj, 'ROSC:SOUR EXT'); % external reference
26 rs_send_query(deviceObj, '*OPC?');
27 waitbar(0.8, h);
28

```

Рисунок 5-9 – Настройка приемника для РЛС с обратной связью (часть 1 из 2)

```

29 rs_send_command(deviceObj, 'ADEM ON'); % enter analog demodulation mode
30 rs_send_command(deviceObj, 'CALC:FEED 'XTIM:FM'); % FM mode
31 rs_send_command(deviceObj, 'ADEM:MTIME 52us'); % measurement time is 60us
32 rs_send_command(deviceObj, 'ADEM:AF:COUPLing DC'); % AF coupling DC
33 % number of data points in measurement :
34 rs_send_command(deviceObj, ['SWEEP:POINTS ' num2str(settings.numPoints)]);
35
36 rs_send_command(deviceObj, 'INIT:CONT ON'); % sweep mode to collect samples
37 rs_send_query(deviceObj, '*OPC?');
38
39 rs_send_command(deviceObj, 'INIT:CONT OFF'); % single sweep mode
40
41 rs_send_command(deviceObj, 'TRIG:SOUR EXT'); % trigger Setup
42 rs_send_query(deviceObj, '*OPC?');
43
44 clear deviceObj;
45
46 close(h); % close waitbar
47

```

Рисунок 5-9 – Настройка приемника для РЛС с обратной связью (часть 2 из 2)

Несмотря на то, что источник [13] называется "Набор инструментов ... для генераторов сигналов", основные вызовы для программирования приборов "rs_send_command" и "rs_send_query" могут быть использованы и для других приборов. Поэтому для принимающей стороны используется тот же интерфейс программирования приборов, т.е. он используется для приборов из семейства FSxx, как показано в листинге на рисунках 5-9 и 5-10. В строках 22 и 23 производится установка частоты и уровня в соответствии с допустимыми глобальными параметрами. Работа прибора осуществляется на основе команд SCPI, выделенных светло-серым цветом. На основании содержимого строки 41 прибор построит измеренную кривую при следующем сигнале запуска, который появится на входном разъеме запуска устройства. Выполнение функции завершается формированием в

памяти дисплея одного действительного демодулированного сигнала, который считывается функцией "TraceFile.m".

5.1.3.3 Функция TraceFile

Данная функция считывает из приемника данные о кривой и сохраняет их в формате, совместимом с ПО MATLAB. Имя файла указывается через входной параметр функции, см. рисунки 5-5 и 5-6, строки 18 и 41.

5.1.3.4 Функция GetBits

Данная функция, в итоге, получает битовый шаблон, используя IQ-диаграмму сигнального созвездия, и строит результаты в лестничной диаграмме MATLAB. Функция вызывается из основной программы (рисунок . 5-6, строка 46). Функция возвращает итоговый битовый шаблон, который можно использовать для вычисления кода преднамеренных помех или любой другой последовательности, которая должна быть повторно передана на летающий объект.

5.2 Библиография

- [1] Pozar David M., 2005, Microwave Engineering, third edition, WILEY, ISBN 978-0-471-44878-5
- [2] Merrill I. Skolnik (Editor in Chief), 1990, radar Handbook, Second Edition McGraw-Hill, ISBN 0-07-057913-X
- [3] Heuel, 2013, "Radar Waveforms for A&D and Automotive Radar", White Paper, R&S Application Note Nr. 239, available from <http://www.rohde-schwarz.com/appnote/1MA239>
- [4] Naseef, Minihold, Bednorz, 2013, "Testing S-Parameters on Pulsed Radar Power Amplifier Modules", R&S Application Note Nr. 126, available from <http://www.rohdeschwarz.com/appnote/1MA126>, video available for download
- [5] Bues, Minihold, 2012, "Overview of Tests on Radar Systems and Components", R&S Application Note Nr. 127, available from <http://www.rohde-schwarz.com/appnote/1MA127>
- [6] Minihold, Bues, 2012, "Introduction to Radar System and Component Tests", R&S Application Note Nr. 207, available from <http://www.rohde-schwarz.com/appnote/1MA207>
- [7] R&S®ZVA network analyzer basics part 4: Amplifier gain and matching, YouTube Video, 21.2.2012, available from <https://www.youtube.com/watch?v=6B7tS-Mj3BU>, retrieved at July 24th, 2014
- [8] Mahafza, Bassem R., 2005, Radar Systems Analysis and Design Using MATLAB, Second Edition, Chapman & Hall, ISBN 1-58488-532-7
- [9] Radar Tutorial #1: Demonstrating radar principles using a vector network analyzer, YouTube Video Series / 1 of 5 items, 12.6.2014, available from https://www.youtube.com/watch?v=ISkPcv7C_Uk&list=UUoJfm2BU72j699FH3lUr3mg, retrieved at July 24th, 2014
- [10] Tröster-Schmid C., 2013, Simulating Fading with R&S® Vector Signal Generators, R&S Application Note Nr. 1GP99, available from <http://www.rohde-schwarz.com/appnote/1GP99>
- [11] Heuel, Schmitt, 2014, Rohde & Schwarz webinar: Analysis of FMCW radar signals in automotive applications, available from <https://www.youtube.com/watch?v=8qaCSQ83ZyU&list=UUoJfm2BU72j699FH3lUr3mg>
- [12] R&S® Pulse Sequencer Software, Rohde & Schwarz, 2012, available from <http://www.rohde-schwarz.com/en/software/smbvk6/>
- [13] T.Röder, C.Tröster, 2013, MATLAB Toolkit for R&S® Signal Generators, R&S Application Note Nr. 1GP60, available from <http://www.rohde-schwarz.com/appnote/1GP60>
- [14] Wendler, Wolfgang, 2014, Seamless realtime analysis of frequency hopping with the R&S®FSW, R&S NEWS 210/14, pg. 28, available from <http://cdn.rohde->

[schwarz.com/pws/dl_downloads/dl_common_library/dl_news_from_rs/magazin/NEWS_210_150dpi_english.pdf](http://www.schwarz.com/pws/dl_downloads/dl_common_library/dl_news_from_rs/magazin/NEWS_210_150dpi_english.pdf)

[15] R&S®SMW200A, June 2014, Vector Signal Generator, Specifications 02.02, available from <http://www.rohde-schwarz.com/en/> , search tag "SMW200A", Brochures and Data Sheets

[16] Bues, 2014, Generation and Analysis of Pulsed Radar Signals, R&S Application Note Nr. 1MA234, available from October 2014, <http://www.rohde-schwarz.com/appnote/1MA234>

[17] Wikipedia, "Barker code", available on "http://en.wikipedia.org/wiki/Barker_code", retrieved at August 5th, 2014

[18] Dr. Steffen Heuel, 11.2014, "Real-time Radar Target Generation", R&S Application Note Nr. 1MA256, available from <http://www.rohde-schwarz.com/appnote/1MA256>

[19] R&S® FSW Signal and Spectrum Analyzer Specifications, Rohde & Schwarz, 2014, available from http://cdn.rohde-schwarz.com/pws/dl_downloads/dl_common_library/dl_brochures_and_datasheets/pdf_1/FSW_datsw_en_5214-5984-22_v1000.pdf, retrieved at August 14th, 2014

6 О компании Rohde & Schwarz

Rohde & Schwarz представляет собой независимую группу компаний, специализирующуюся на производстве электронного оборудования. Rohde & Schwarz является ведущим поставщиком контрольно-измерительных систем и приборов, оборудования для теле- и радиовещания, систем радиомониторинга и радиопеленгации, а также систем профессиональной радиосвязи специального назначения. Rohde & Schwarz успешно работает уже более 80 лет, представительства и сервисные центры компании находятся в более чем 70 странах. Головной офис компании расположен в Мюнхене, Германия.

Ресурсосберегающие методы проектирования

- Экологическая безопасность и экологический след
- Энергоэффективность и низкий уровень выбросов
- Долгий срок службы и оптимизированные производственные расходы



Представительство в Москве:

115093 Москва, ул. Павловская, 7, стр.1, этаж 5
тел. +7 (495) 981 35 60, факс +7 (495) 981 35 65
info.russia@rohde-schwarz.com
www.rohde-schwarz.ru

Контакты в регионах

- Европа, Африка, Ближний Восток
Phone +49 89 4129 12345
customersupport@rohde-schwarz.com
- Северная Америка
Phone 1-888-TEST-RSA (1-888-837-8772)
customer.support@rsa.rohde-schwarz.com
- Латинская Америка
Phone +1-410-910-7988
customersupport.la@rohde-schwarz.com
- Азия/Тихоокеанский регион
Phone +65 65 13 04 88
customersupport.asia@rohde-schwarz.com
- Китай
Phone +86-800-810-8228 / +86-400-650-5896
customersupport.china@rohde-schwarz.com

Штаб-квартира

Rohde & Schwarz GmbH & Co. KG
Mühlhofstraße 15 | D - 81671 München
+ 49 89 4129 - 0 | Fax + 49 89 4129 - 13777
www.rohde-schwarz.com

Данный документ и поставляемые программы могут применяться только при соблюдении условий, изложенных в области загрузки веб-сайта Rohde & Schwarz.

R&S® является зарегистрированным товарным знаком компании Rohde & Schwarz GmbH & Co. KG. Товарные знаки и торговые марки принадлежат соответствующим владельцам.