

Применение приемопередатчиков серии Proteus компании Tabor Electronics для тестирования радаров

УДК 621.317

Для отладки и тестирования систем РЛС часто применяют генераторы радиолокационных целей, которые могут формировать сигналы с добавлением временных задержек, доплеровских сдвигов частоты и помех, что позволяет моделировать различные сценарии работы радара с одной или несколькими целями. К таким приборам относятся приемопередатчики серии Proteus компании Tabor Electronics. В статье рассматриваются принципы работы радаров, приводится информация о характеристиках приемопередатчиков серии Proteus и их применении для тестирования радаров.

Передатчик радара генерирует различные формы электромагнитного сигнала. Эти сигналы усиливаются и передаются, а достигая цели – отражаются и принимаются приемником радара. Разница во времени и частоте передаваемого и принятого сигналов используется для определения расстояния и скорости цели.

Обратите внимание на рис. 1: сигнал формируется в определенный момент времени (t_{tx}) с определенной мощностью (P_{tx}) и частотой ($f_{transmit}$). Сформированный сигнал излучается с помощью антенны с коэффициентом усиления G . Далее сигнал передается по воздуху со скоростью света (c). Цель с эффективной площадью рассеяния σ будет поглощать часть энергии сигнала, а часть – отразит обратно к приемнику, который зачастую совмещен с передатчиком. Расстояние до цели равно разнице во времени между излучением и приемом сигнала, умноженной

на скорость света и деленной на 2. Если цель перемещается, появится сдвиг частоты сигнала, с использованием которого можно вычислить скорость цели и определить, приближается ли она к передатчику или удаляется от него.

Радар постоянно повторяет описанный выше алгоритм. Если интервал повторения импульсов (Pulse Repletion Interval, PRI) мал, или если длительность импульса (Pulse Width, PW) велика, то способность радара различать две или более близких цели снижается, это называется неоднозначностью.

Как мы знаем, короткие импульсы, имеющие в спектре высокие частоты, распространяются в свободном пространстве хуже, чем низкочастотные сигналы. Из-за этого при построении радаров всегда ищут компромисс между разрешением и дальностью. Зачастую системы имеют несколько радаров, один формирует низкочастотные

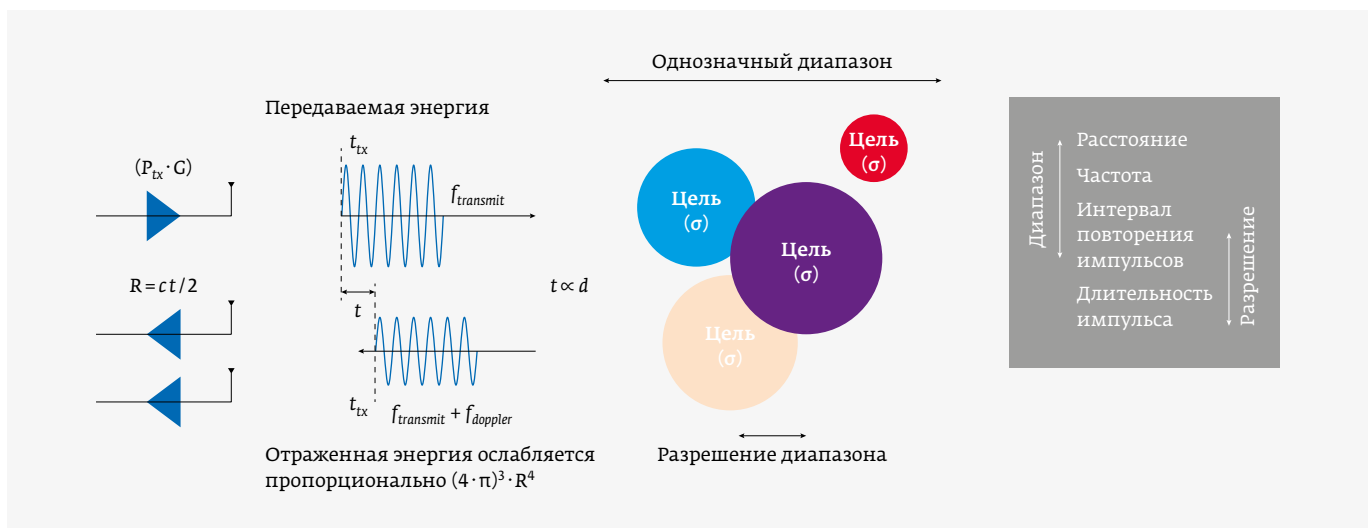


Рис. 1. Принцип работы радара

и длительные импульсы для поиска целей на расстоянии (поисковый радар), а второй может быстро изменять интервал повторения и типы импульсов, чтобы иметь возможность идентифицировать цели на близком расстоянии с высоким разрешением и наименьшей неоднозначностью.

РАСЧЕТ ДАЛЬНОСТИ ДЕЙСТВИЯ РАДАРА

Распространение радиочастотной энергии в радиолокационной системе моделируется с помощью уравнения дальности радиолокации. Рассмотрим следующее уравнение:

$$P_r \propto \frac{1}{R^4} \cdot \frac{1}{f^2} \cdot \sigma \cdot \frac{1}{BW}$$

Принимаемая мощность (P_r) обратно пропорциональна величине расстояния R в степени 4 – это самая большая потеря в системе. Кроме того, P_r обратно пропорциональна квадрату частоты (f) и ширине полосы (BW) сигнала.

Мы можем разбить приведенное выше уравнение на следующие блоки (рис. 2): энергия мощности передатчика и усиления антенны в R метрах от передатчика; рассеянная энергия, отраженная от цели; усиление приемной антенны. В месте приема сигнал очень слаб по сравнению с передаваемым, поэтому нужно учитывать шумовые характеристики приемника.

Теперь рассмотрим антенные системы и усилители мощности. Сама антенна не усиливает сигнал, а фокусирует излучение в одном направлении. Например (рис. 3), изотропная антенна излучает энергию одинаково во всех направлениях, а направленная антенна, такая как антенна Yagi, суммирует всю энергию и фокусирует ее в одном направлении. Таким образом, используя направленную антенну, мы добавляем системе некоторое усиление.

Уравнение для определения дальности работы радара показывает, что дальность уменьшается с увеличением частоты, поэтому более низкие частоты будут распространяться дальше. Также частотный диапазон определяет размер антенны. Длина волны уменьшается по мере увеличения частоты передачи. Таким образом, для низкочастотных систем, то есть систем, оптимизированных

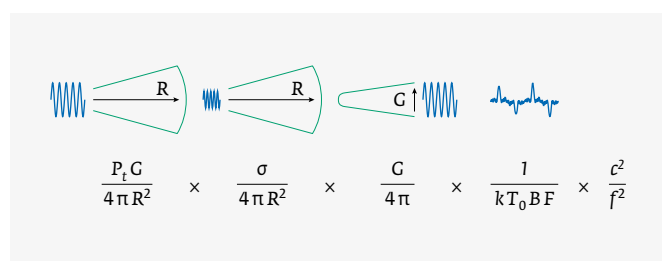


Рис. 2. Компоненты уравнения дальности

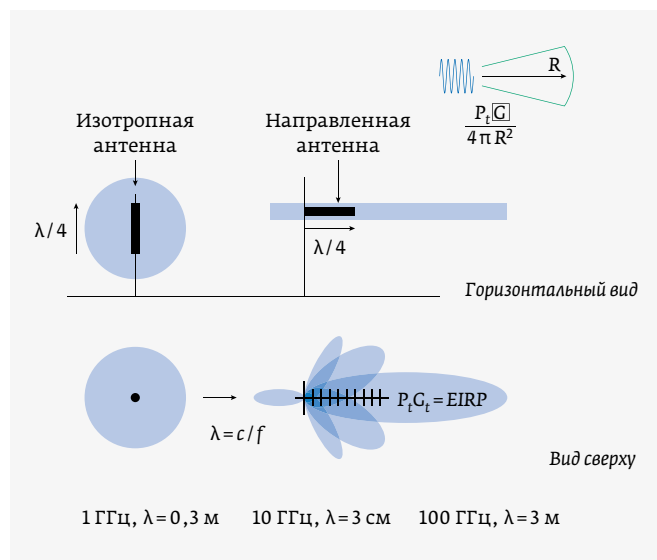


Рис. 3. Диаграммы направленностей различных антенн. EIRP (Equivalent Isotropically Radiated Power) – эквивалентная изотропно-излучаемая мощность

для увеличения дальности, потребуются большие антенны.

Усиление антенны и влияние длины волны на размер антенны представлены на рис. 3. На рисунке показана изотропная антенна, имеющая физическую длину, равную 1/4 длины волны, по мере увеличения частоты физический размер этой антенны так же будет уменьшаться. Например, частоте 1 ГГц соответствует длина волны 30 см, 10 ГГц – 3 см и 100 ГГц – 3 мм. Одновременно следует помнить, что с увеличением частоты сигнала его ослабление в атмосфере увеличивается.

На рис. 4 показан сигнал радара в частотной области. Ширина полосы спектральных лепестков обратно пропорциональна ширине импульса, то есть импульсы большей длительности занимают меньший спектр (полосу сигнала), чем импульсы меньшей длительности.

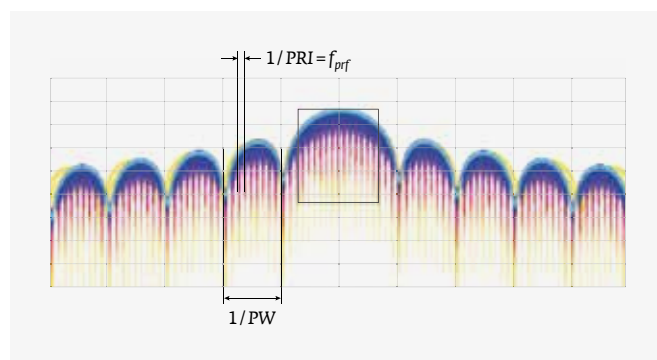


Рис. 4. Сигнал радара в частотной области. PW – ширина импульса

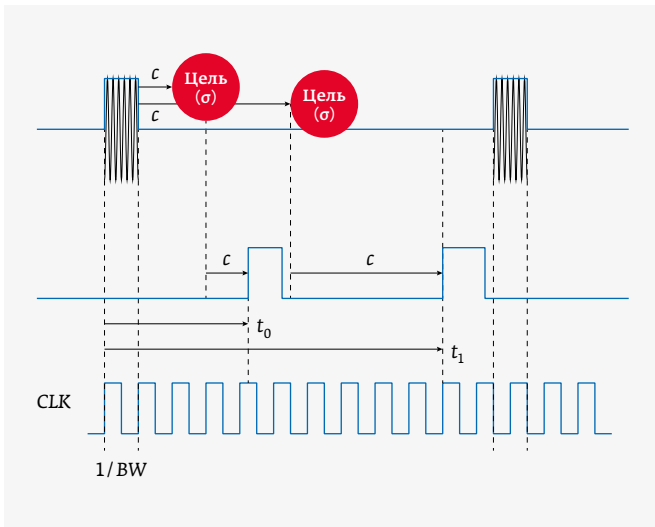


Рис. 5. Синхронизация импульсов. BW – ширина полосы сигнала

ИЗМЕРЕНИЕ РАССТОЯНИЯ ДО ЦЕЛИ

Как отмечалось выше, импульс большей длительности может распространяться на большее расстояние, но компромисс заключается в том, что вы теряете способность различать две близко расположенные цели. Импульс короткой длительности не будет распространяться так далеко, но вы сможете различать две близко расположенные цели.

На рис. 5 показано, что импульсы синхронизируются с тактовой частотой. Эта тактовая частота и определяет разрешение радара, а период – обратно пропорционален ширине полосы импульса. Тактовая частота используется для квантования диапазона расстояний, каждый элемент рассматривается как ячейка диапазона.

Частота повторения импульсов (PRI) определяет диапазон однозначного определения расстояния. Если время возврата больше, чем интервал повторения

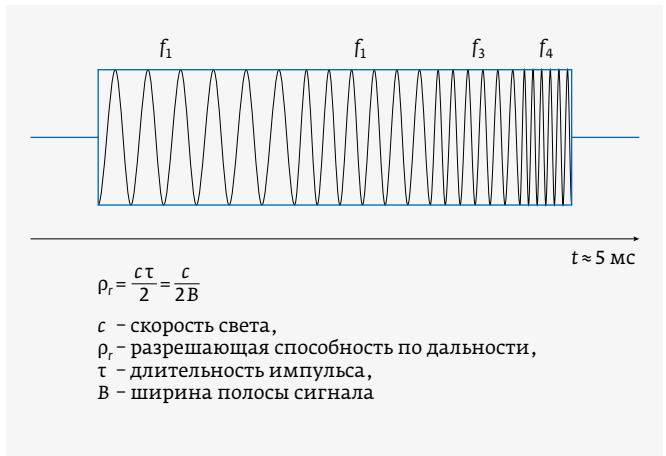


Рис. 6. Линейная частотная модуляция импульса

импульсов (PRI), то расстояние до цели будет измеряться неверно, то есть расстояние будет «неоднозначно». Также, если мы формируем длинный импульс и две цели находятся близко друг к другу, они могут оказаться в одной и той же ячейке.

Как следует из уравнения дальности, если радару необходимо обнаруживать сигналы на большом расстоянии, то ему нужен сигнал с узкой полосой пропускания (импульсы большой длительности) и низкой частотой. Если нам необходимо измерять расстояние более точно, интервал повторения импульсов также должен иметь большую продолжительность.

Радары дальнего действия с низким разрешением используются для поиска целей на больших расстояниях. Но, несмотря на то, что с их помощью можно обнаруживать цели на расстоянии сотен километров, разрешение этих радаров недостаточно для точного определения положения цели.

Наилучшее разрешение для точного определения положения цели достигается путем использования более

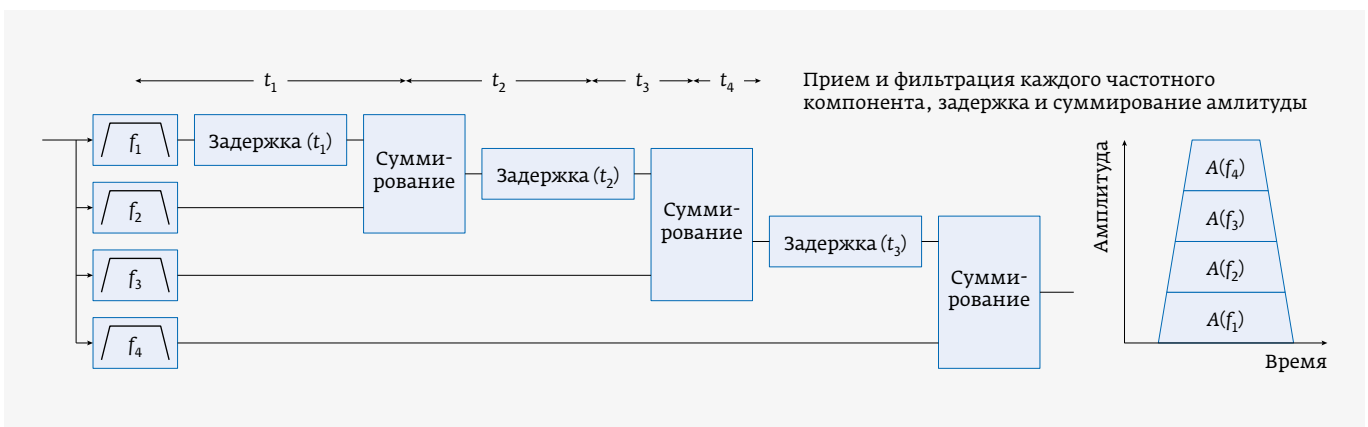


Рис. 7. Упрощенная схема согласованного фильтра

коротких импульсов (широкая полоса пропускания) и более коротких интервалов повторения импульсов. Однако данные радары неспособны определять цели на больших расстояниях.

Для нахождения компромисса между дальностью и точностью используют методы модуляции (рис. 6). На этом рисунке для РЧ-импульса применяется линейная частотная модуляция (Linear Frequency Modulation, LFM). Данная модуляция позволяет использовать преимущества импульса большой длительности, который мы можем довольно легко усиливать, совместно с преимуществами коротких импульсов (высоким разрешением). В приемнике, если мы пропустим этот сигнал через набор согласованных фильтров, сможем создать эквивалент короткого импульса высокого разрешения.

На рис. 7 представлена упрощенная схема такого согласованного фильтра. На рис. 6 сигнал был разделен на четыре полосы частот: f_1 , f_2 , f_3 и f_4 . На рис. 7 используется группа фильтров приемника. Для каждой

полосы частот добавляется задержка, равная длительности этой полосы. При суммировании амплитуд сигналов мы получаем эффективный «суммарный» амплитудный импульс малой продолжительности. Этот метод используется, когда требуется высокое разрешение по дальности.

Когда требуется исключительно высокое разрешение, например в активных методах самонаведения, применяемых в ракетах класса «земля-воздух», или в автомобильных радарх, используется непрерывное излучение с частотной модуляцией (Frequency-Modulated Continuous Wave, FMCW) (рис. 8а). Линейное изменение частоты реализуется с помощью генератора, управляемого напряжением (ГУН). Используя ответвитель, часть сигнала подается на смеситель в качестве гетеродина, в то время как большая часть мощности передается на циркулятор и затем излучается.

Отраженный сигнал, который имеет значительно меньшую мощность, также подается на смеситель, а частота

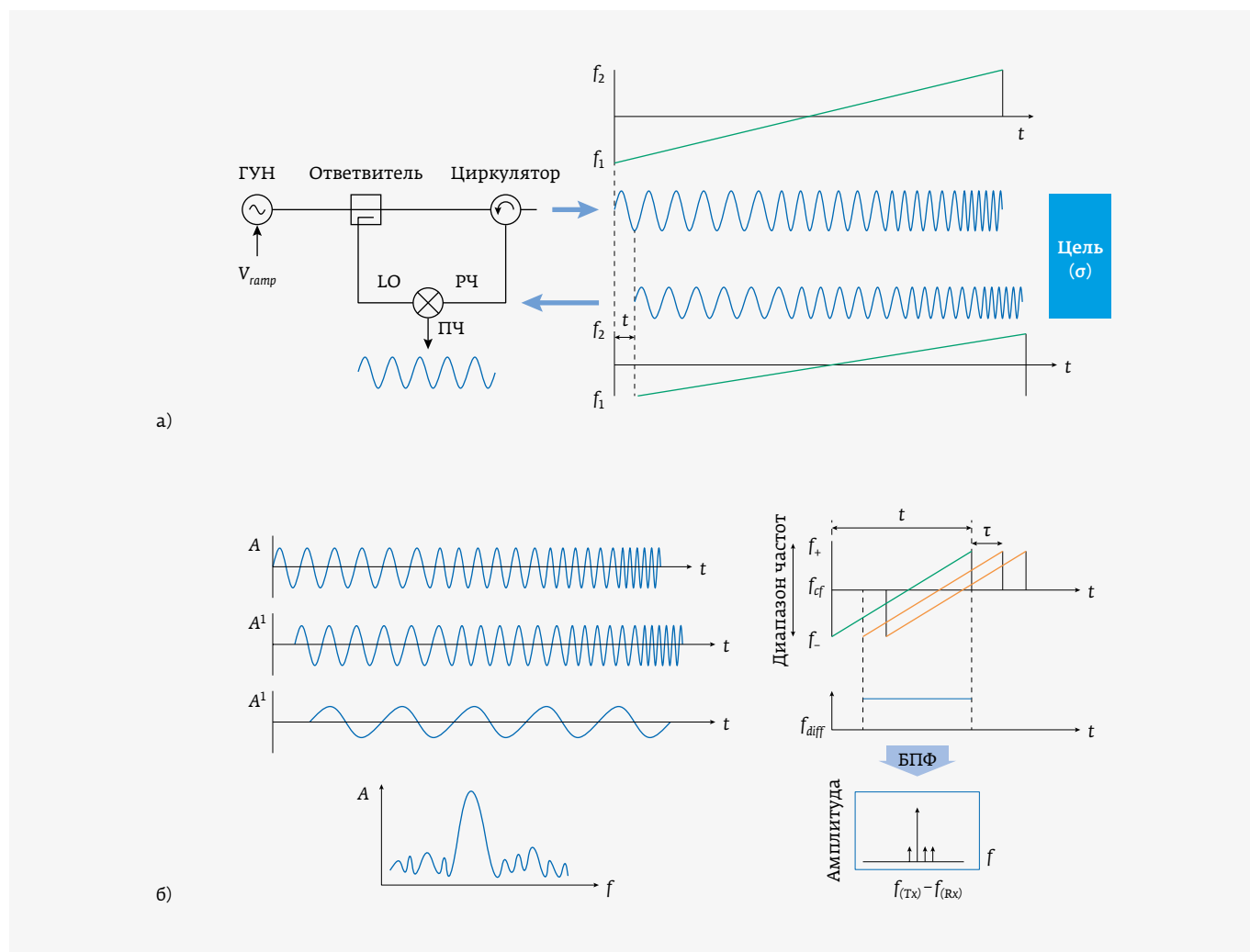


Рис. 8. Радиолокатор непрерывного излучения с частотной модуляцией: а – схема работы; б – выполнение БПФ

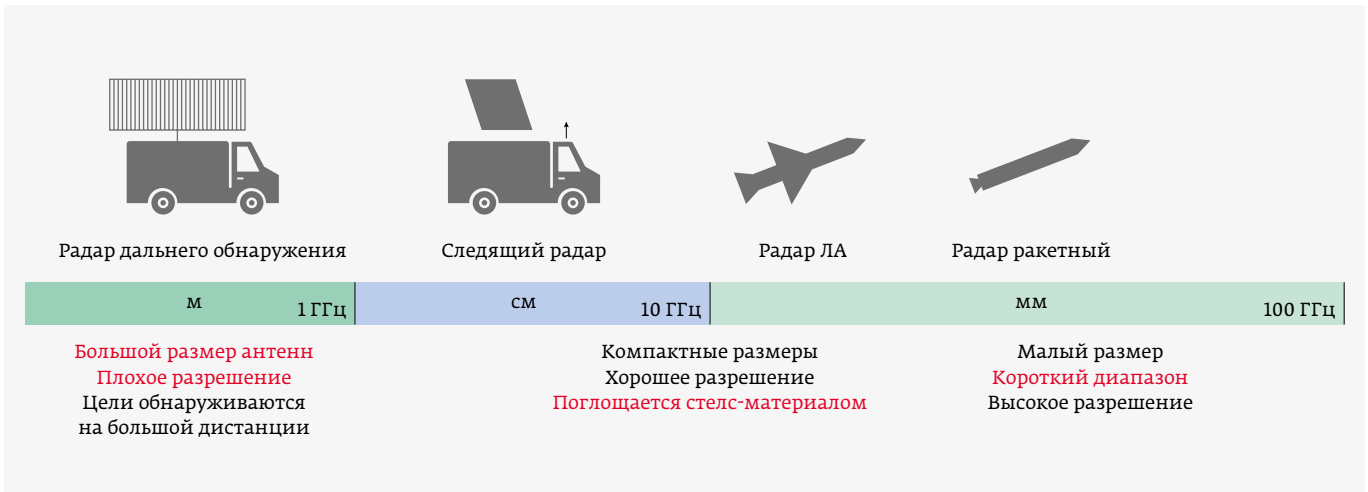


Рис. 9. Различные типы радаров

вычитается с использованием нелинейных характеристик смесителя, создающего сигнал ПЧ.

Поскольку процесс микширования эффективно вычитает два сигнала в частотной области, мы получаем сигнал с частотой, равной разности частот переданного и принятого сигналов (рис. 8б). Выполнение БПФ сигнала дает частотные составляющие, которые пропорциональны расстоянию до цели. Чем шире диапазон изменения частоты, тем выше разрешение.

Современные автомобильные системы работают на частоте 77 ГГц с диапазоном изменения 4 ГГц, что дает отличное разрешение. Однако диапазон действия таких радаров ограничен несколькими сотнями метров.

На рис. 9 показаны различные типы радаров и способы решения описанных ранее проблем. Радар дальнего действия может обнаруживать цели на большом расстоянии, однако система очень велика из-за требуемых размеров

антенны, а разрешение плохое из-за узкой полосы пропускания, доступной на низких частотах.

Радары слежения и бортовые радары работают на более высоких частотах, более компактны за счет антенны меньшего размера, имеют хорошее разрешение по дальности и могут отслеживать цели в диапазоне десятков миль. В них используются переменные PRI, немодулированные импульсы и импульсы с LFM – в зависимости от дальности действия. Радиопоглощающие конструкции (стелс) обычно оптимизируются для этих частотных диапазонов.

Для приложений с малым радиусом действия (<300 м) используется широкополосный LFM с высоким разрешением. Широкие полосы пропускания требуют высокой несущей частоты, что приводит к уменьшению габаритов систем. Такие системы могут поместиться в конусе ракеты или в передней части автомобиля. Однако дальность их действия ограничена несколькими сотнями метров.

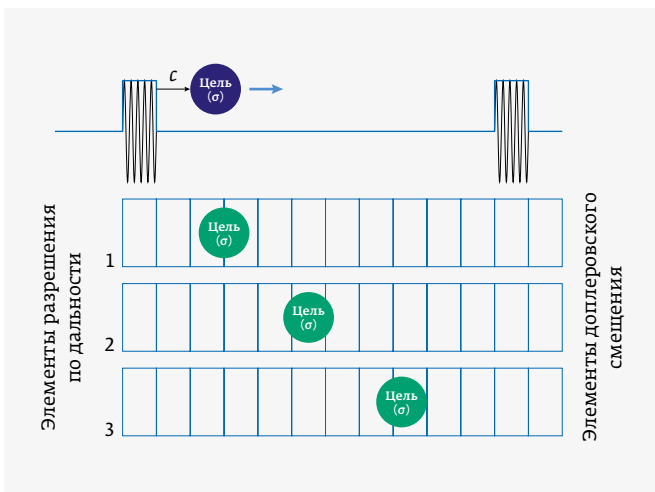


Рис. 10. Принцип определения скорости цели

ИЗМЕРЕНИЕ СКОРОСТИ ЦЕЛИ

Ранее мы обсуждали только измерение расстояния, по сути, рассматривали статичную систему с неподвижными целями. Однако, помимо расстояний, радар также может измерять скорость цели, используя эффект Доплера. Это означает, что можно наблюдать разницу частот между переданным и принятым сигналами, и ее можно измерить, чтобы вычислить скорость цели и определить, приближается ли она к радару или удаляется от него.

Разность частот равна удвоенной скорости, деленной на длину волны, и по сравнению с несущей частотой радара представляет собой очень маленькое приращение или уменьшение частоты. Опять же, как и расстояние до цели, доплеровская частота также может быть неоднозначной.

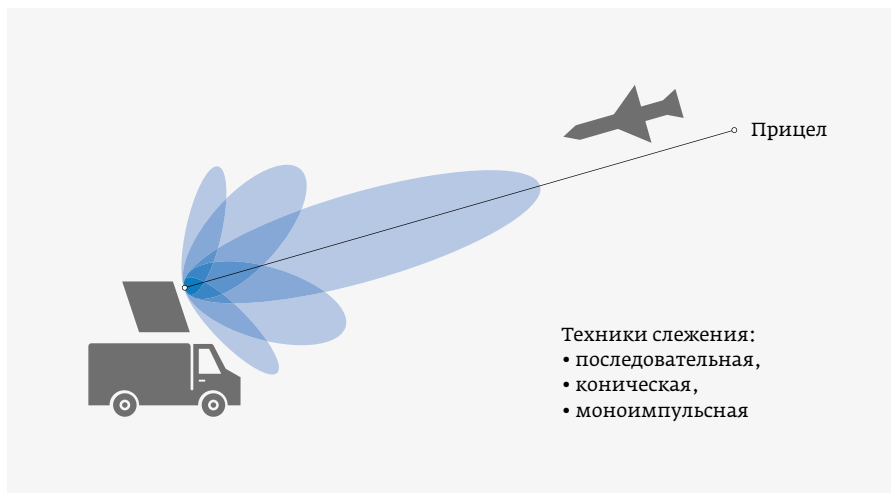


Рис. 11. Пример РЛС управления огнем

Если доплеровская частота больше частоты повторения импульсов (ЧПИ), то измерение будет неверным, и максимальная скорость не может быть больше, чем длина волны, умноженная на ЧПИ.

Поскольку доплеровская частота очень мала по сравнению с несущей частотой, мы должны измерять ее с использованием ряда импульсов. Ранее мы обсуждали концепцию элементов (ячеек) диапазона дальности для измерения расстояния. Чтобы измерить доплеровский сдвиг, мы должны наблюдать небольшую разность

частот в нескольких ячейках диапазона дальности, формируя двумерную матрицу, горизонтальная часть которой содержит элементы разрешения по дальности, а вертикаль – элементы доплеровского смещения (рис. 10).

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОЗИЦИИ ЦЕЛИ

Мы можем измерить расстояние и скорость, но как узнать, где находится цель? Один из способов заключается в механическом перемещении радара таким образом, чтобы луч покрывал большую площадь. Традиционное изображение радара представляет собой вращающуюся

антенну. Антенна может вращаться по кругу, скажем, со скоростью около 5 об/мин, обнаруживая цели в горизонтальной плоскости (азимут), или, альтернативно, может двигаться вверх и вниз, обнаруживая цели в вертикальной плоскости (угол места).

Для управления огнем необходимо удерживать цель в пределах прямой видимости (рис. 11). Один из методов заключается в механическом вращении антенны по конусу вокруг линии прицеливания. Если цель выходит за пределы прицеливания, радар обнаружит, что цель пересекла

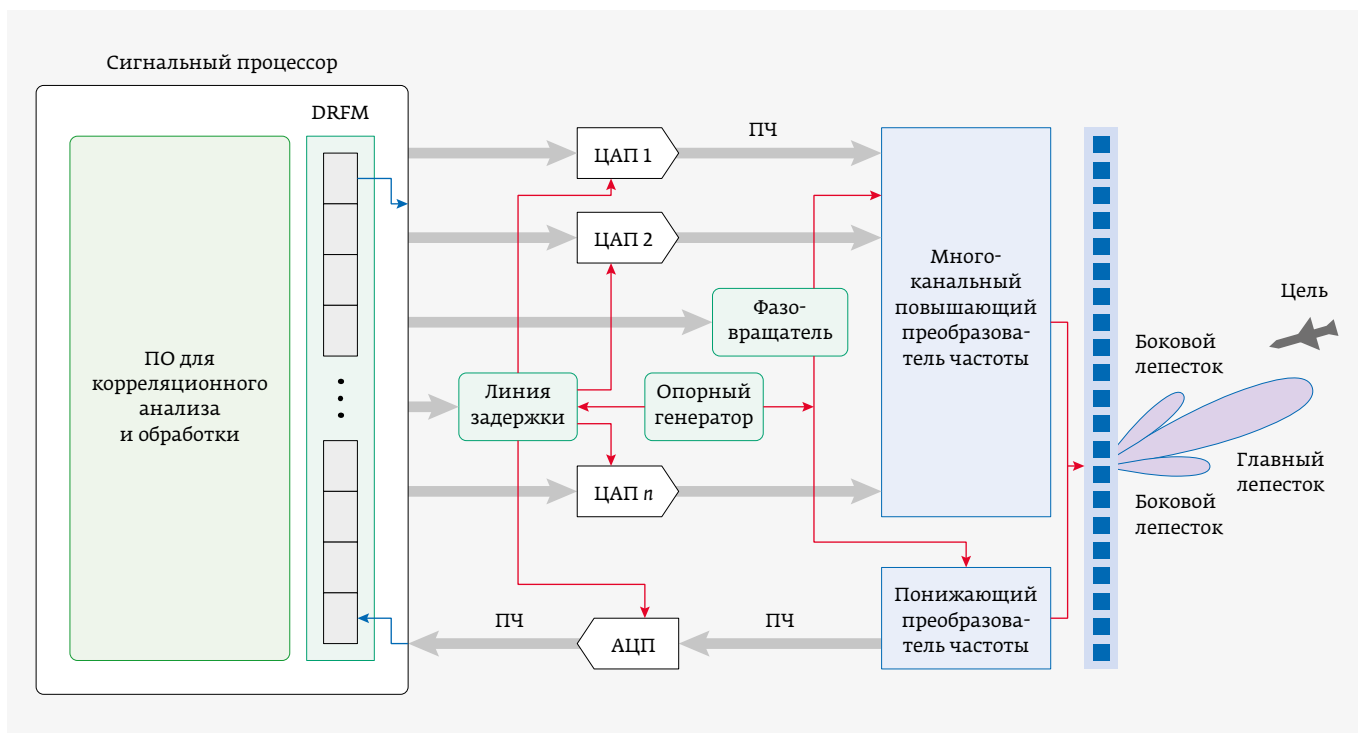


Рис. 12. Блок-схема RTC



Рис. 13. Приборы серии Proteus AWT компании Tabor Electronics: а – портативный; б – настольный; в – модуль PXI

луч, и механически переместит систему управления огнем, чтобы вернуть цель в прицел.

Механические системы и небольшие антенные решетки для поиска и управления огнем использовались в течение многих лет, однако современные радары, как правило, используют более сложные электронные методы для определения местоположения. Для управления огнем применяются моноимпульсные системы, в которых используется много лучей, что позволяет рассчитать азимут и угол места, при этом все лучи должны быть направлены на цель.

Радары AESA, или активная решетка с электронным сканированием, представляют собой фазированную антенную решетку – управляемую компьютером решетку антенных элементов, в которой луч радиоволн может быть электронным образом направлен в разные стороны без перемещения антенны. Один радар с АФАР может выполнять сканирование пространства в широком диапазоне.

ГЕНЕРАТОР РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ЦЕЛЕЙ

Для отладки и тестирования новых систем РЛС часто используется генератор радиолокационных целей (Radar Target Generator, RTG). Он принимает тестируемые сигналы радара, затем добавляет к ним дальность, скорость, помехи и ретранслирует сигналы обратно на радар, таким образом имитируя одну цель или набор целей. Такое решение позволяет существенно сократить время отладки радарных систем.

Существует много типов RTG: простая линия задержки, переконфигурирование имеющихся радарных систем или использование системы на основе цифровой радиочастотной памяти (Digital Radio Frequency Memory, DRFM) (рис. 12), в которой используются высокоскоростные РЧ ЦАП и АЦП, управляемые ПЛИС.

СЕМЕЙСТВО TAVOR PROTEUS AWT

Приемопередатчики сигналов произвольной формы (Arbitrary Waveform Transceiver, AWT) – это класс продуктов, в которых использованы современные технологии РЧ ЦАП и АЦП, объединенные высокоскоростной ПЛИС, что позволяет решать сложные задачи измерения и моделирования в таких областях, как квантовая физика, радиочастотные испытания полупроводников, радары и системы радиоэлектронной борьбы. Их блок-схема похожа на систему DRFM, но имеет упрощенную систему управления и настройки, позволяющую легко настраивать цели и сценарии.

Семейство продуктов Proteus компании Tabor Electronics обладает высокими техническими характеристиками, что делает их ведущими в отрасли приемопередатчиками сигналов произвольной формы. Это модульное решение, основанное на стандарте PXIe, представлено в трех форм-факторах, соответствующих требованиям различных пользователей: модульное, портативное (управление через внешний интерфейс) и настольное (рис. 13).

Серия Tabor Proteus AWT имеет уникальную архитектуру, объединяющую генератор сигналов произвольных форм и оцифровщик на одной ПЛИС, как показано на рис. 14.

Такая структура позволяет создавать многоканальные РЧ-системы и эмулировать моноимпульсный радар или радар с АФАР, или создавать сценарии с несколькими целями.

Ключевые особенности серии Proteus:

- до четырех каналов и частота дискретизации ЦАП до 9 Гвыб/с;
- разрешение ЦАП до 16 бит;
- режим DUC (цифровое повышение частоты) для повышающего преобразования РЧ во всех каналах;
- перекос между каналами <25 пс;

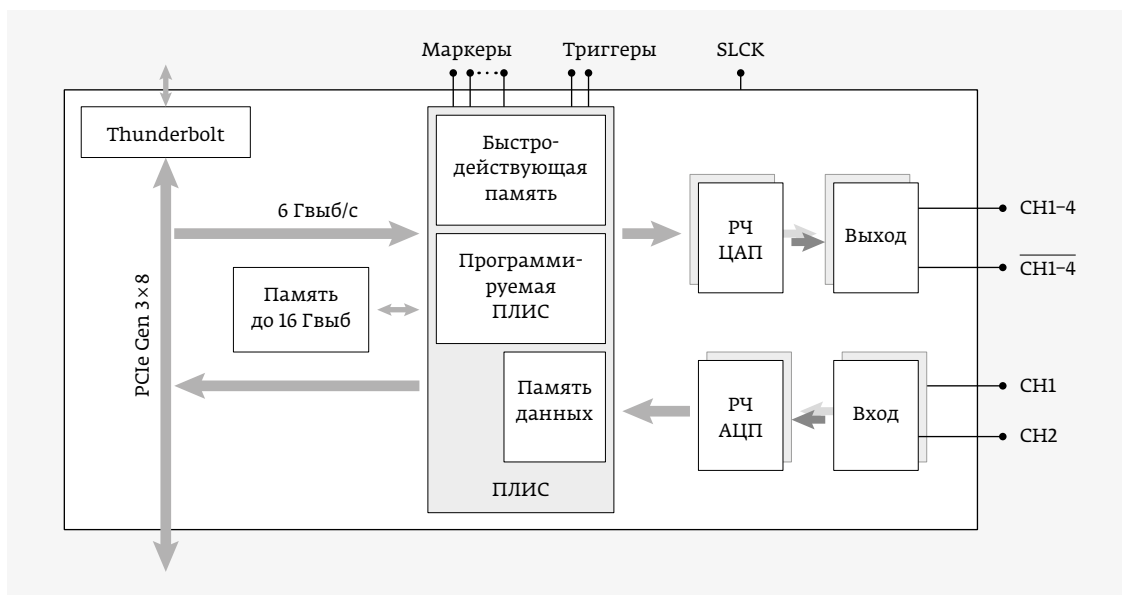


Рис. 14.
Блок-схема
Tabor
Proteus AWT

- до двух каналов дигитайзера на модуль;
- частота дискретизации до 5,4 Гвыб/с;
- 12-битное вертикальное разрешение АЦП;
- режим DDC (цифровое понижение частоты) – для преобразования РЧ с понижением частоты во всех каналах;
- режим обратной связи;
- задержка цифрового тракта снижена до 400 нс;
- прямая потоковая передача на ЦАП.

ТАВОР PROTEUS AWT КАК RTC

Радиочастотные приемопередатчики сигналов произвольной формы серии Proteus имеют очень компактные размеры и форм-фактор. Каждый базовый модуль имеет

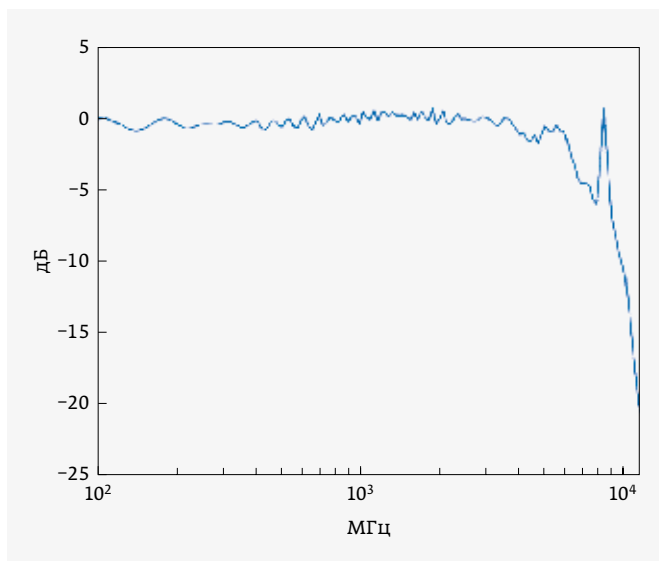


Рис. 15. Частотная характеристика АЦП

четыре синхронных канала ЦАП с поддержкой DUC и два синхронных канала АЦП с функциями DDC.

Применительно к радарам, каналы АЦП могут принимать эхоимпульс, отраженный от цели, и передавать его через DDC. Работа в нескольких зонах Найквиста может быть реализована от низких частот до X-диапазона. Для более повышения точности и улучшения частотных характеристик Proteus AWT можно использовать с внешними модуляторами/демодуляторами IQ и гетеродинами серии LUCID.

РАБОТА В ШИРОКОПОЛОСНОМ РЕЖИМЕ

Tabor AWT поддерживает создание сигналов с полосой пропускания до 2 ГГц с использованием ЦАП и 2,7 ГГц с помощью АЦП (рис. 15). Одновременно в пределах полосы пропускания ЦАП и АЦП может быть организована быстрая фазово-когерентная перестройка частоты.

Серия Proteus AWT была создана для работы как в качестве устройств генерации/моделирования радиолокационных сигналов, так и с дополнительным оцифровщиком, для осуществления анализа. Благодаря характеристикам приборов возможны:

- построение автономного генератора радиолокационных сигналов;
- работа в замкнутом режиме In loopback – режиме приемопередатчика сигналов произвольной формы;
- потоковая передача данных непосредственно на ЦАП;
- настройка работы встроенной ПЛИС с использованием специальной программной оболочки.

По материалам сайта taborelec.com
Перевод с англ. А. Мендерова (АО «ПриСТ»)