

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2024.3.6>

УДК: 004.056.5

ПРИМЕНЕНИЕ РЕЗОНАНСНО-РЕФЛЕКТОМЕТРИЧЕСКОГО МЕТОДА ДЛЯ ПОИСКА GPS-ТРЕКЕРОВ

М.А. Буневич¹, А.А. Казека¹, А.Ю. Ключкий¹, И.А. Врублевский¹,
Ван Фуцянь², Чжан Пэн², Чжан Цзяньцян²

¹ Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
220013, Беларусь, Минск, ул. П. Бровки 6

² Шаньдунский научный компьютерный центр
250101, Китай, пров. Шаньдун, г. Цзинань, ул. Кеиань, №19

Статья поступила в редакцию 29 января 2024 г.

Аннотация. Описаны принципы работы перспективного резонансно-рефлектометрического метода поиска GPS-трекеров его преимущества. Показано, что обнаружение переизлученного сигнала зависит от таких параметров, как уровень мощности и длительность зондирующих импульсов, частоты зондирующих импульсов по отношению к резонансной частоте входного тракта GPS-трекера; добротности входного тракта GPS-трекера и расстояния от сканирующей антенны до GPS-трекера. Предложена блок-схема установки для экспериментальной апробации и определения оптимальных параметров обнаружения переизлученного сигнала и выбрана элементная база для ее реализации. Разработан на основе резонансно-рефлектометрического метода макет модуля аппаратно-программного комплекса. Полученные экспериментальные данные подтвердили работоспособность резонансно-рефлектометрического метода обнаружения GPS-трекеров.

Ключевые слова: резонансно-рефлектометрическая локация, GPS-трекеры, обнаружение GPS-трекеров, техническая защита информации.

Автор для переписки: Врублевский Игорь Альфонсович,
vrublevsky@bsuir.edu.by

Введение

В настоящее время для отслеживания местоположения объектов и получения информации о маршрутах их перемещения широко используются GPS-трекеры. Современные GPS-трекеры отличаются компактными размерами, благодаря чему их легко интегрировать в различные технические системы. При этом использование элементов питания с повышенным сроком службы гарантирует работу устройства на протяжении длительного времени. Основными сферами применения глобальных систем позиционирования гражданского назначения являются: навигация и картография, мониторинг спортивных активностей и тренировок, мониторинг местоположения домашних животных, исследование и мониторинг окружающей среды, оптимизация работы в сельском хозяйстве, охрана личного и корпоративного имущества, интеграция в системы противоугонной защиты.

Массовый выпуск и снижение стоимости GPS-трекеров обеспечивают широкую доступность таких устройств, что делает их привлекательными для несанкционированного использования. Например, простейшие GPS-метки могут скрытно устанавливаться на транспортных средствах или в личных вещах объектов наблюдения для отслеживания их перемещений. Другим примером несанкционированного использования может быть активация по геолокации: в этом случае GPS-трекеры могут использоваться для определения местоположения объекта и активации удаленных устройств или его функций. Поэтому обнаружение несанкционированных GPS-трекеров или аналогичных устройств является актуальной задачей.

В настоящее время обнаружение несанкционированных GPS-меток осуществляется с помощью традиционных средств, таких как рентгеновские устройства, нелинейные локаторы и металлоискатели. Однако, каждый из этих методов имеет свои ограничения и недостатки и поэтому не может служить универсальным средством поиска скрытых GPS-меток. Например, в силу своих довольно больших размеров, с помощью рентгеновского оборудования нельзя исследовать конструкции зданий на наличие скрытых устройств.

Металлоискатели не способны обнаружить миниатюрные устройства, а также устройства, спрятанные в металлоконструкциях. Нелинейный локатор позволяет обнаружить побочные гармоники полупроводниковых элементов при их накачке мощным электромагнитным импульсом, но эффективность такого локатора при поиске экранированных устройств крайне невысока.

Перспективным методом, отличающимся от традиционных средств поиска, является резонансно-рефлектометрический метод [1]. Использование такого метода позволяет обнаруживать даже миниатюрные метки и поэтому является новым этапом в развитии технологий поиска и обнаружения скрытых устройств, обеспечивая высокую эффективность поиска.

Идея резонансно-рефлектометрического метода заключается в сканировании пространства зондирующими сигналами в заданном диапазоне частот и последующем приеме отраженных сигналов. GPS-метки работают, как правило, в узком диапазоне частот, ограниченном конкретным стандартом. Для этого их антенные системы выполнены в виде высокодобротного контура. При облучении зондирующим сигналом, совпадающим с резонансной частотой контура GPS-метки, амплитуда наведенных токов в контуре увеличится в соответствии с добротностью контура. Это, в свою очередь, приведет к заметному усилению уровня принятого сигнала на частоте работы передатчика локатора, что будет указывать на присутствие GPS-метки в зоне обнаружения.

1. GPS-трекеры и их элементная база.

Одна из наиболее часто встречаемых схем GPS-трекера показана на рисунке 1. Для задачи обнаружения GPS-трекера наибольший интерес представляет входной каскад его модуля, который состоит из ПАВ-фильтра (SAW) и малошумящего усилителя (LNA). Как видно из рисунка, данные элементы используются для увеличения чувствительности приема и вместе с приемной антенной будут определять добротность входного контура GPS-трекера. Современные ПАВ-фильтры, разработанные для GPS-модулей, имеют схожие параметры и, как правило, обладают полосой пропускания шириной

2...10 МГц. Частотные характеристики ПАВ-фильтра представлены на рисунке 2.

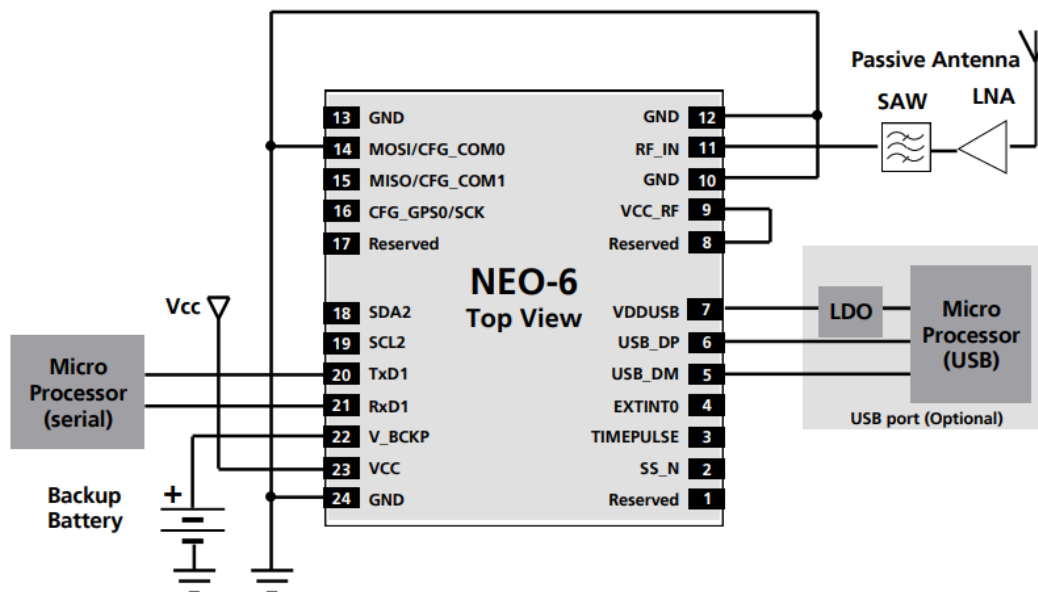


Рис. 1. Типовая схема GPS-трекера.

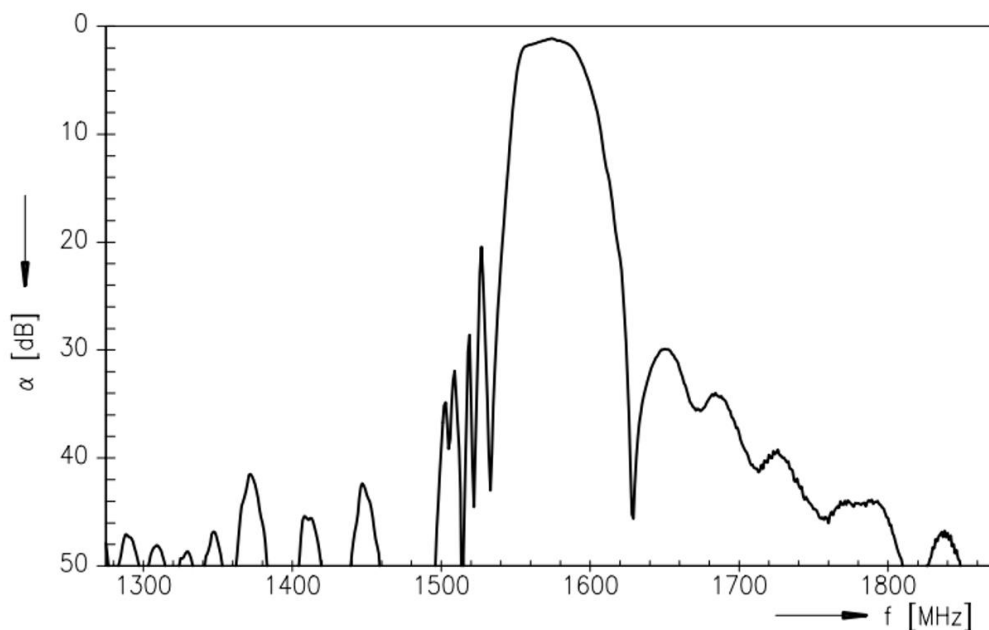


Рис. 2. Зависимости коэффициента передачи (S21) от частоты ПАВ-фильтра.

В большинстве современных GPS-трекерах в качестве приемной антенны применяются керамические пассивные патч-антенны (рис. 3). Такие антенны могут иметь несколько рабочих диапазонов с достаточно узкой полосой пропускаемых частот (таблица 1) и высоким коэффициентом усиления 5-8 дБ.

Таблица 1. Зависимость полосы рабочих частот антенны от ее линейных размеров.

Размеры, мм	Полоса частот, МГц
36x36x4	40
25x25x4	20
18x18x4	10
15x15x4	8
12x12x4	7
10x10x4	5

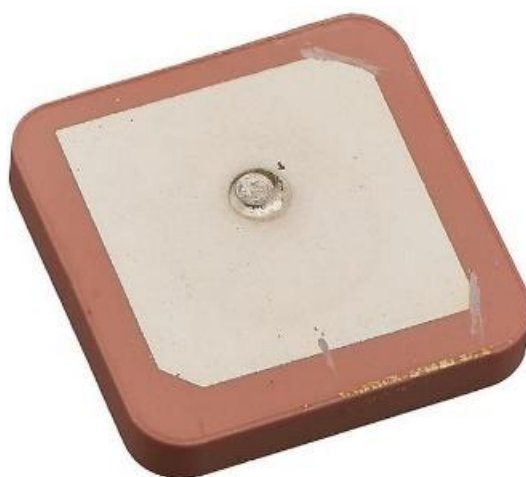
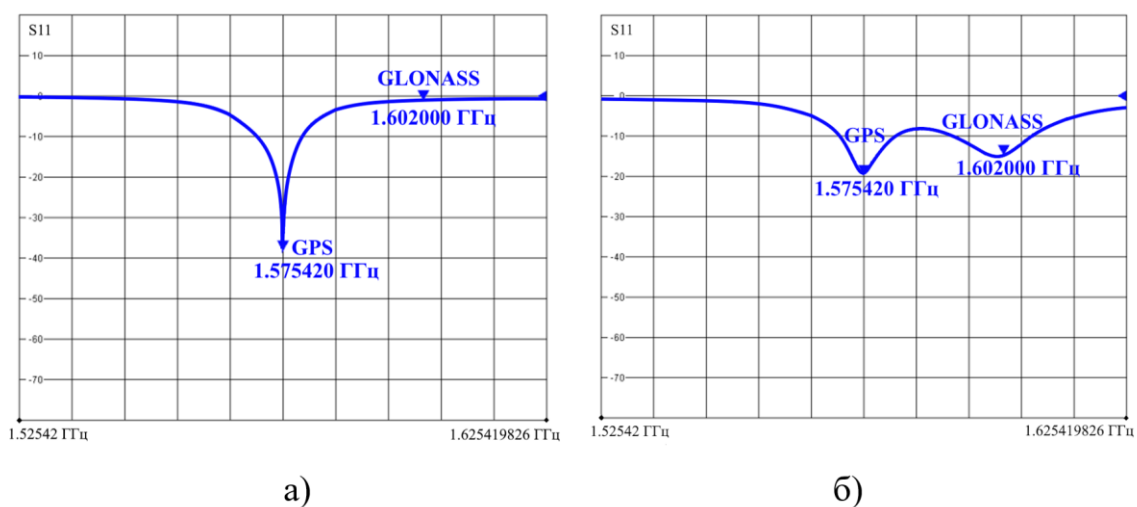


Рис. 3. Внешний вид антенны для GPS-трекеров.

На рисунке 4 представлены зависимости коэффициента отражения (S_{11}) от частоты для однодиапазонной и двухдиапазонной антенн.

Рис. 4. Зависимости коэффициента отражения (S_{11}) от частоты для однодиапазонной (а) и двухдиапазонной (б) антенн.

На основании представленных зависимостей на рисунке 2 и 4 можно предположить, что резонансная частота для двух типов антенн и входных ПАВ-фильтров будет составлять примерно 1575 МГц.

2. Определение оптимальных параметров обнаружения.

Для поиска GPS-трекеров предлагается использовать резонансно-рефлектометрический метод. Основная идея данного метода заключается в зондировании пространства короткими радиоимпульсами и приеме отраженных сигналов. При нахождении в зоне сканирования GPS-трекера от него в пространство будут переизлучаться остаточные колебания, возникающие в результате резонансных явлений в высокодобротном контуре из ПАВ-фильтра и приемной антенны. Обнаружение переизлученного сигнала от GPS-трекера в этом случае зависит от следующих параметров:

- уровень мощности и длительность зондирующих импульсов;
- частота зондирующих импульсов по отношению к резонансной частоте входного тракта GPS-трекера;
- добротность входного тракта GPS-трекера;
- расстояние от сканирующей антенны до GPS-трекера.

Для определения оптимальных параметров обнаружения было предложено провести экспериментальную апробацию. В качестве критерия работоспособности было принято обнаружение остаточных колебаний на осциллографе по отношению к фоновому шуму. Блок схема установки для экспериментальной апробации и определения оптимальных параметров обнаружения представлена на рисунке 5.

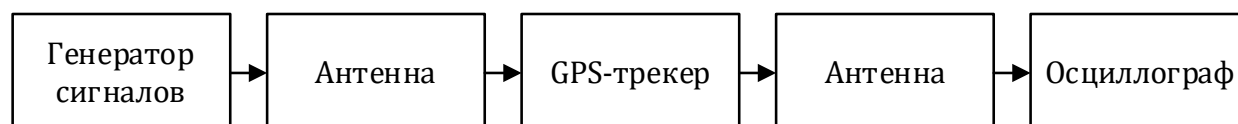


Рис. 5. Блок схема установки экспериментальной апробации для определения оптимальных параметров обнаружения.

Для источника зондирующих радиоимпульсов был выбран высокочастотный генератор сигналов AnaPico APSIN20G. Диапазон рабочих

частот данного генератора от 100 кГц до 20,4 ГГц с разрешением 0,1 мГц. Уровень выходного сигнала -20 до +15 дБм с разрешением 0,01 дБ. Модуляция импульсная, минимальная ширина формируемого импульса 30 нс, время нарастания/затухания 10 нс. В качестве осциллографа был применен Keysight MSO9404 с полосой пропускания 4 ГГц. Приемная и передающая широкополосные антенны – Rohde & Schwarz HE300 с диапазоном рабочих частот от 20 МГц до 7,5 ГГц. Для эксперимента был выбран широкодоступный GPS-трекер Ublox NEO-6, который располагался между передающей и приемной антенной на расстоянии 1м.

Частота генератора радиоимпульса изменялась в диапазоне от 1570 МГц до 1575 МГц. Уровень формируемого сигнала генератора был выбран +12 дБм. Длительность импульса изменялась от 30 нс до 200 нс.

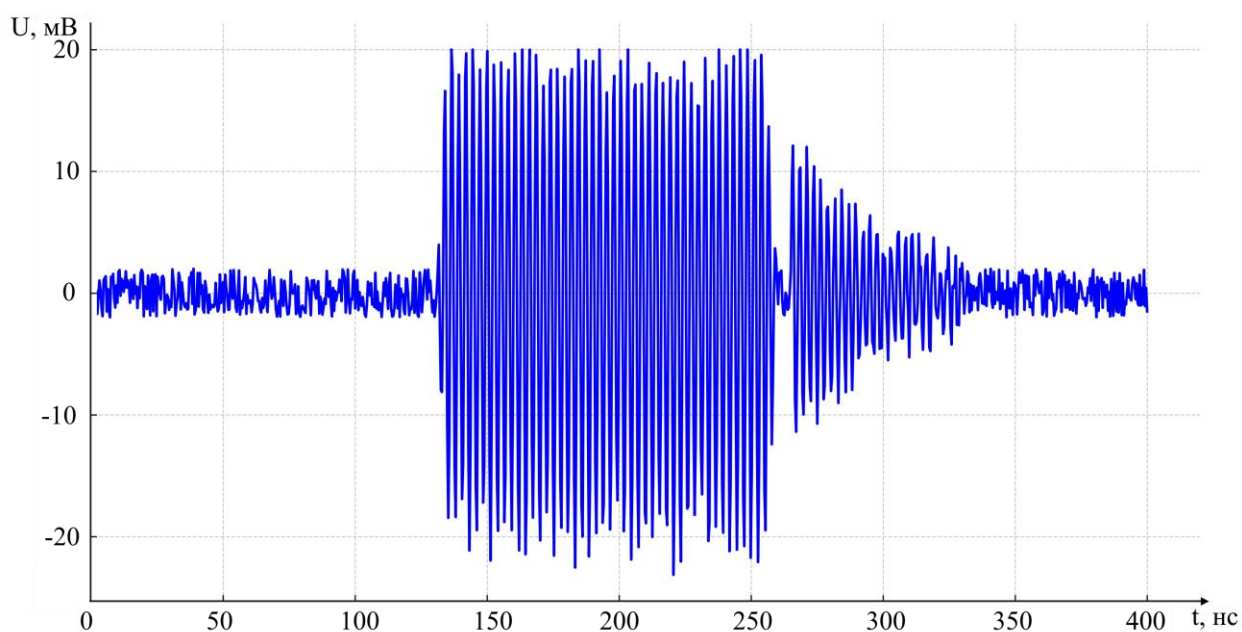


Рис. 6. Вид осциллограммы отражённого сигнала от GPS-трекера, полученной при экспериментальной апробации.

По результатам эксперимента было установлено, что на несущей частоте 1572 МГц и максимальной длительности радиоимпульсов равной 130 нс, как показано на осциллограмме (рис. 6), наблюдаются остаточные колебания длительностью 60 нс. При увеличении или уменьшении длительности зондирующих радиоимпульсов, уровень остаточных колебаний уменьшался.

3. Разработка макета аппаратно-программного комплекса.

Для разработки аппаратно-программного комплекса необходимо учитывать следующие установленные экспериментальные данные:

1) Установлено, что зондирование радиоимпульсом длительностью от 100 до 130 нс и частотой несущей 1572 МГц приводит к резонансу и наблюдению остаточных колебаний от GPS-трекера. При увеличении или уменьшении длительности зондирующих радиоимпульсов остаточные колебания не обнаруживаются.

2) Остаточные колебания принимаемого сигнала имеют длительность 60 нс. Экспериментально установлено, что для оцифровки и последующей обработки такого сигнала частота дискретизации должна быть не менее 100 МГц.

На основе предварительно проведенных экспериментов и анализа его данных была осуществлена разработка макета аппаратно-программного комплекса. Для макета были определены следующие характеристики и требования к элементной базе.

Характеристики макета:

- диапазон рабочих частот 100...6000 МГц;
- шаг перестройки частоты от 100 КГц;
- максимальная мощность излучения до 30 дБм;
- длительность зондирующих радиосигналов от 30 нс до 130 мкс;
- мгновенная полоса обзора до 200 МГц;
- чувствительность радиоприемного устройства не хуже -110 дБм;
- динамический диапазон приёмного тракта не менее 70 дБм;
- время непрерывной работы от АКБ не менее 6 часов.

Схемные решения и элементная база:

1) Формирование, передача, прием и обработка широкополосного сигнала производится на оборудовании, построенном по технологии SDR [2].

2) Приемная и передающая части выполнены на основе высокоинтегрированного радиочастотного трансивера ADRV9009 [3].

3) Цифровая обработка сигнала и управления осуществляется с помощью многопроцессорной системы на кристалле (MPSoCs) Xilinx's Zynq UltraScale+[4].

Внешний вид такого оборудования показан на рисунке 7, структурные схемы MPSoCs и трансивера представлены на рисунке 8 и рисунке 9 соответственно.

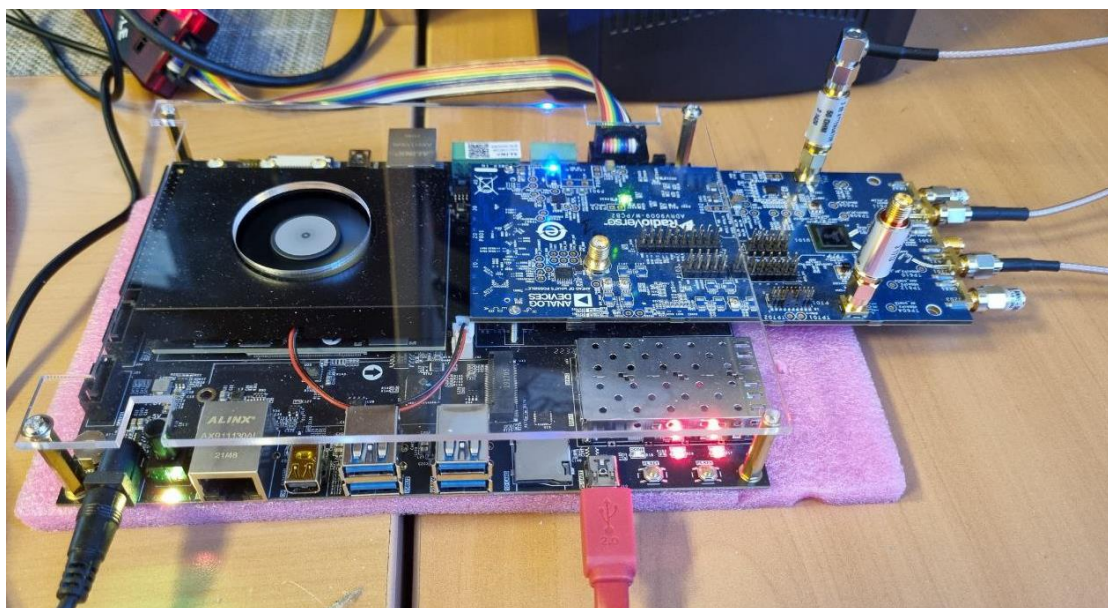


Рис. 7. Внешний вид оборудования, построенного по технологии SDR на основе Xilinx's Zynq UltraScale+ и трансивера ADRV9009.

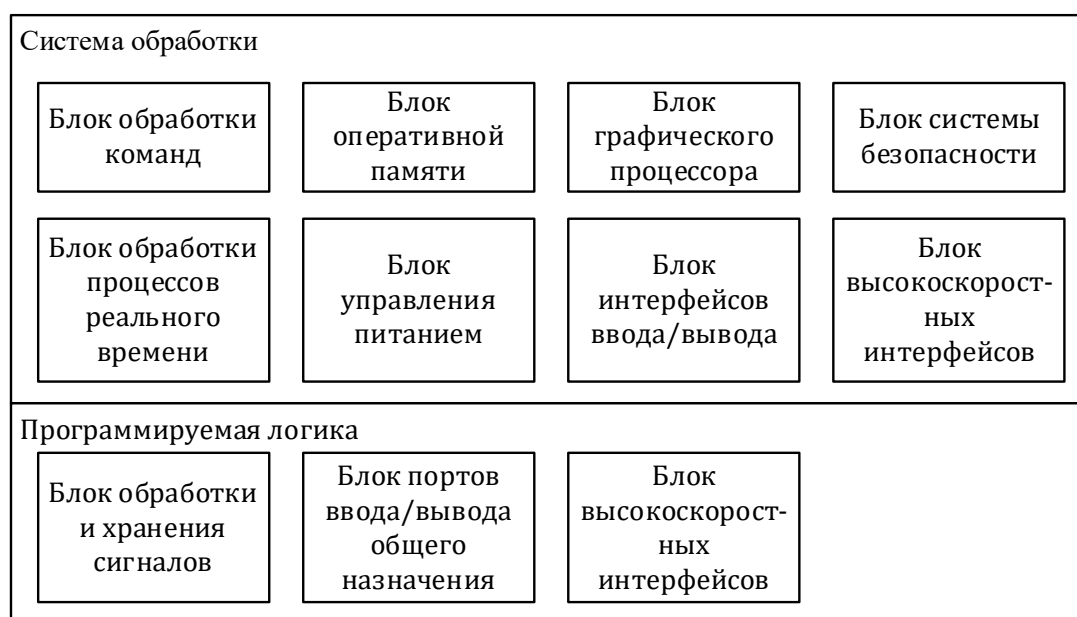


Рис. 8. Структурная схема MPSoCs Xilinx's Zynq UltraScale+.

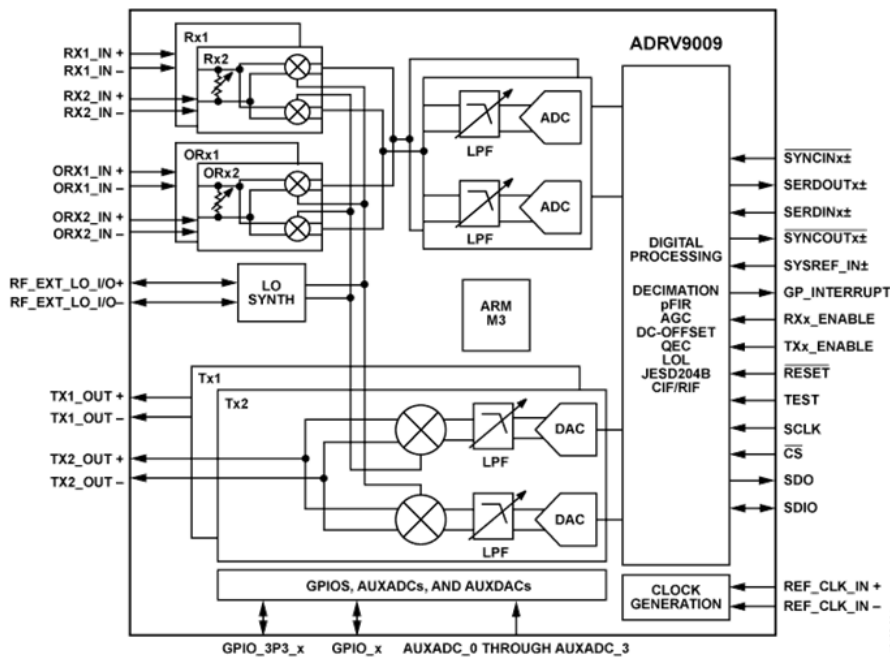


Рис. 9. Структурная схема трансивера ADRV9009.

Приемный модуль представляет собой блок коммутации и преселектор с банком фильтров для фильтрации нежелательных помех и каскадов предварительного усиления. Структурная схема показана на рисунок 10.

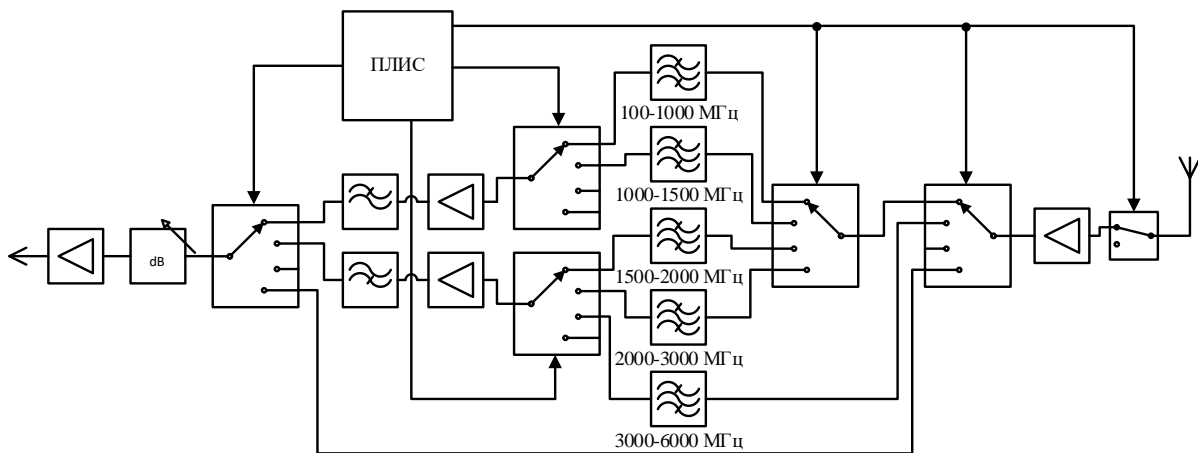


Рис. 10. Структурная схема приемного модуля с блоком коммутации и преселектором.

Коммутация сигналов выполняется с помощью сверхвысокочастотных ключей с минимальной задержкой. Время переключения данных ключей составляет 10 нс, а время нарастания фронта – 2 нс. Обладают хорошей изоляцией между каналами до 48 дБ, минимальные потери на 6 ГГц до 2,1 дБ и точкой компрессии 29 дБм Управление такими ключами осуществляется от

ПЛИС для того, чтобы минимизировать помехи и влияние цифровой части на аналоговую.

На выходе приемного модуля стоит управляемый аттенюатор, для автоматической подстройки усиления. Принятый сигнал поступает на приемный канал трансивера, в котором происходит перенос частоты на демодуляторе с частоты приема на нулевую. Затем сигнал отфильтровывается и подается на аналого-цифровой преобразователь. Полученные I/Q отсчеты комплексного сигнала обрабатываются и поступают в MPSoCs. В ПЛИС части выполняются алгоритмы ЦОС и затем данные передаются в DDR память по AXI шине для дальнейшей обработки с помощью ARM ядра. ARM ядро выполняет дальнейшую обработку сигнала и передает полученную информацию по Ethernet (TCP-IP/UDP) на автоматизированное рабочее место оператора для дальнейшего анализа.

Формирование сигнала начинается с формирования отсчетов в MPSoCs с последующей фильтрацией и интерполяцией. Полученные отсчеты поступают на трансивер ADRV9009. Затем с помощью ЦАП отсчеты преобразуются в аналоговый сигнал, который далее поступает на модулятор и переносится на необходимую радиочастоту. Сформированный сигнал трансивером поступает на передающий модуль, показанный на рисунке 11.

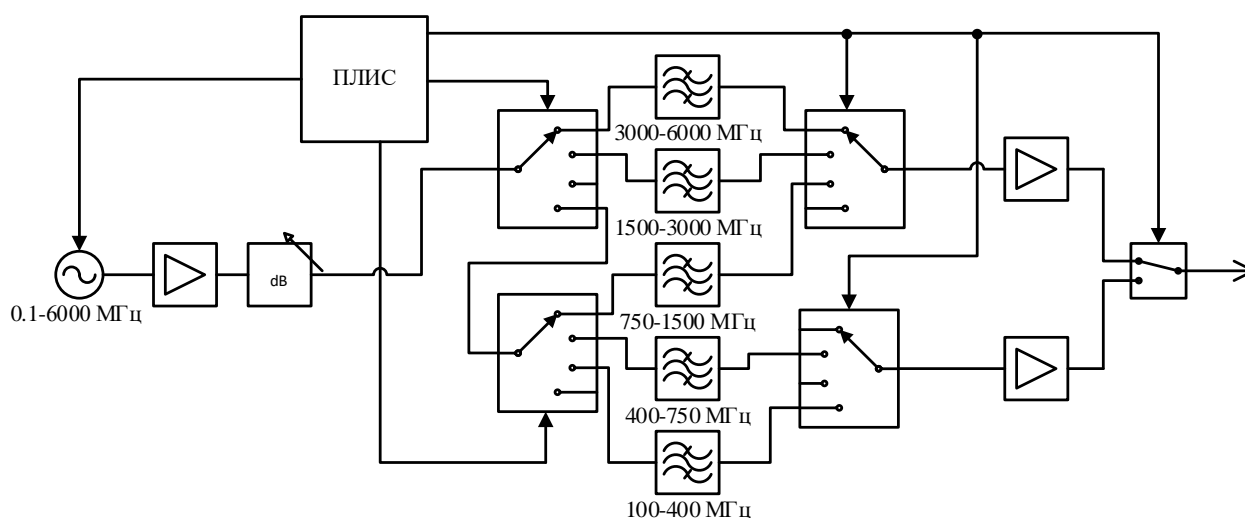


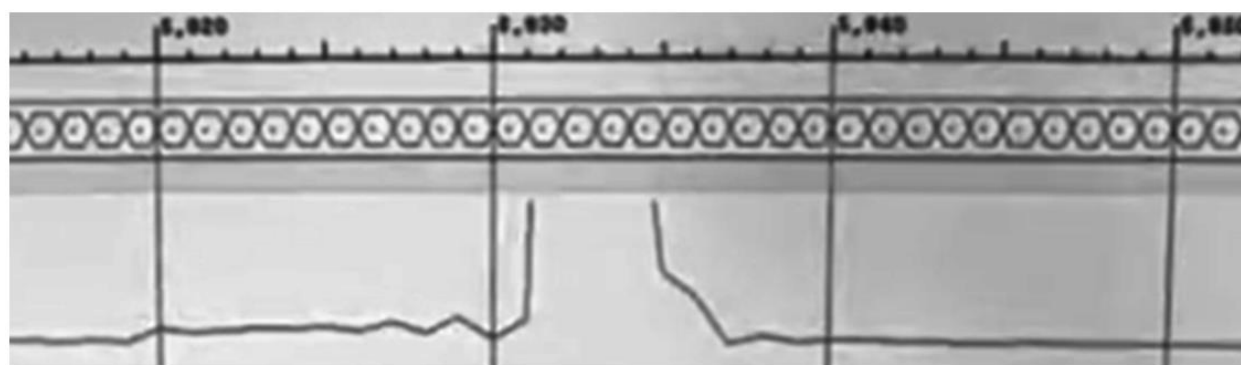
Рис. 11. Структурная схема передающего модуля.

На входе передающего модуля сигнал поступает на регулируемый цифровой аттенуатор, затем на высокоскоростной коммутатор и на банк фильтров для подавления нежелательных гармоник и помех сформированного сигнала. На выходе сигнал дополнительно усиливается и поступает на высокоскоростной сверхвысокочастотный ключ, который подключен к выходной антенне.

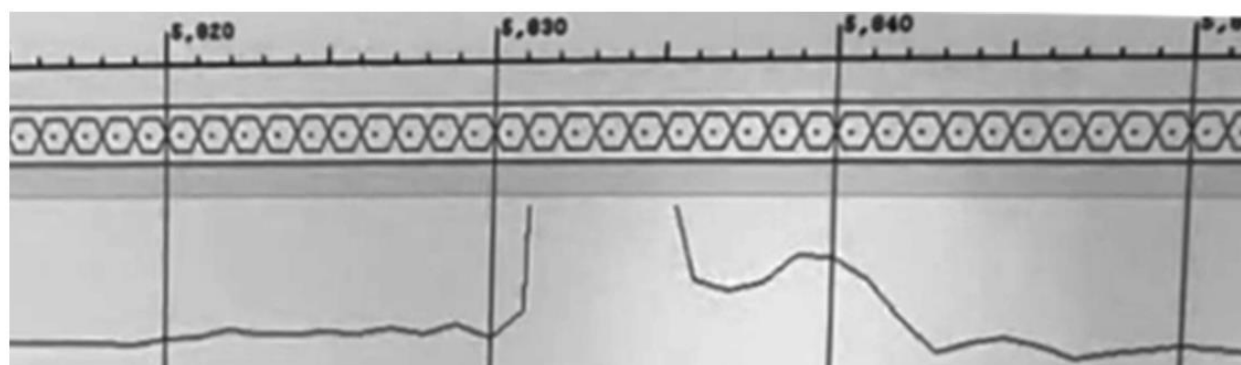
4. Апробация работы аппаратно-программного комплекса.

Полученные отсчеты принимаемого сигнала с трансивера ADRV9009 представлены в комплексном виде. Поэтому для идентификации обнаруженного сигнала применяется квадрат модуля его огибающей.

На рисунке 12 показаны результаты полученных отсчетов для огибающей зондирующего радиочастотного импульса (рис. 12, а) и для огибающей резонанса в случае наличия GPS-трекера вблизи источника радиоизлучения (рис. 12, б).



а)



б)

Рис. 12. Результаты полученных отсчетов для огибающей зондирующего радиочастотного импульса (а) и для огибающей резонанса в случае наличия GPS-трекера вблизи источника радиоизлучения (б).

Таким образом, результаты эксперимента свидетельствуют, что разработанный на основе резонансно-рефлектометрического метода макет аппаратно-программного комплекса с учетом заявленных характеристик и выбранной элементной базы позволяет успешно идентифицировать наличие GPS-трекера.

Заключение

Рассмотрены основные методы поиска и обнаружения GPS-трекеров, используемых для несанкционированного наблюдения за объектами с целью отслеживания их перемещений. На основе анализа существующих методов, показано необходимость использования новых принципов работы систем для повышения эффективности поиска GPS-трекеров.

Описаны принципы работы перспективного резонансно-рефлектометрического метода и его преимущества. Показано, что обнаружение переизлученного сигнала от GPS-трекера в этом случае зависит от таких параметров, как уровень мощности и длительность зондирующих импульсов, частоты зондирующих импульсов по отношению к резонансной частоте входного тракта GPS-трекера; добротности входного тракта GPS-трекера и расстояния от сканирующей антенны до GPS-трекера. Предложена блок-схема установки для экспериментальной апробации и определения оптимальных параметров обнаружения переизлученного сигнала и выбрана элементная база для ее реализации.

По результатам экспериментов с макетом установки было установлено, что на несущей частоте 1575 МГц и максимальной длительности радиоимпульсов равной 130 нс, наблюдались остаточные колебания длительностью 60 нс. Увеличение или уменьшение длительности зондирующих радиоимпульсов приводило к уменьшению уровня остаточных колебаний.

Предложены схемные решения, выбрана элементная база и разработан на основе резонансно-рефлектометрического метода макет модуля аппаратно-программный комплекса. Результаты проведенных экспериментов

свидетельствуют, что разработанный макет аппаратно-программного комплекса позволяет успешно идентифицировать наличие GPS-трекера.

Литература

1. Буневич М.А., Майоров А.И., Врублевский И.А. Использование поисковой техники на основе резонансно-рефлектометрической локации для обнаружения закладных радиоустройств // Журнал радиоэлектроники. 2021. № 12. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2021.12.5>
2. Буневич М.А., Майоров А.И., Врублевский И.А. Применение SDR-приемопередатчиков в системах для поиска закладных радиоустройств // Цифровая трансформация. 2022. Т. 28, № 4. С. 62–71.
3. Встроенный двухканальный высокочастотный приемопередатчик ADRV9009. Техническая спецификация. URL: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ADRV9009.pdf>
4. Многопроцессорная система на кристалле Xilinx Zynq UltraScale+. URL: <https://alinx.com/en/detail/261>

Для цитирования:

Буневич М.А., Казака А.А., Ключкий А.Ю., Врублевский И.А., Ван Фуцянь, Чжан Пэн, Чжан Цзяньцян. Применение резонансно-рефлектометрического метода для поиска GPS-трекеров. // Журнал радиоэлектроники. – 2024. – №. 3. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2024.3.6>