

*МЕТОДЫ И СИСТЕМЫ ЗАЩИТЫ ИНФОРМАЦИИ,
ИНФОРМАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ*

УДК 004.891.1.3

DOI: 10.17212/2782-2230-2021-4-72-90

**ПРИМЕНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИИ SDR (SOFTWARE
DEFINED RADIO) ДЛЯ ВОССТАНОВЛЕНИЯ СИГНАЛОВ
ПОБОЧНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ИЗЛУЧЕНИЙ
ВИДЕОТРАКТА***

А.В. ИВАНОВ¹, И.А. ОГНЕВ², Е.Е. НИКИТИНА³, Л.В. МЕРКУЛОВ⁴

¹ 630073, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой защиты информации. E-mail: andrej.ivanov@corp.nstu.ru

² 630073, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет, аспирант кафедры защиты информации. E-mail: i.ognev.2016@corp.nstu.ru

³ 630073, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет, аспирант кафедры защиты информации. E-mail: lizanikitinasj@gmail.com

⁴ 125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, 4, Московский авиационный институт, магистрант кафедры технологии испытаний и эксплуатации. E-mail: Levmerkulov1@yandex.ru

В настоящей статье представлены результаты восстановления сигналов побочных электромагнитных излучений видеотракта с применением SDR-приемника. Демонстрируется существование потенциального риска утечки конфиденциальной информации через технический канал утечки информации за счет побочных электромагнитных излучений видеотракта, минуя традиционные криптографические и физические методы защиты информации. Атака может быть реализована злоумышленником без специальных технических знаний и специального профессионального дорогостоящего оборудования. Представленный стенд позволяет упростить исследования, касающиеся побочных электромагнитных излучений, а также применять данную технологию для построения процесса обучения по этому направлению. В ходе работы приведено описание понятия технического канала утечки информации и краткое описание побочного электромагнитного излучения видеотракта. Далее кратко описаны технология SDR, выбранный приемник USRP B210 и кроссплатформенный программный пакет с открытым исходным кодом GNU Radio. Подробно описан демонстрационный стенд и приведены результаты восстановления изображения. Помимо этого, рассмотрены два этапа разработки демонстрационного стенда: с использованием имитационного сигнала и реального перехваченного сигнала. Демонстрационный стенд с имитационным сигналом способ-

* Статья получена 31 октября 2021 г.

ствует пониманию пользователем свойств побочных электромагнитных излучений, а также возможных препятствий на пути преобразования перехваченного сигнала в изображение. Исследования реального перехваченного сигнала проводились на мониторе с установленным разрешением 1280×1024 и частотой обновления экрана 60 Гц. Для подключения монитора был использован аналоговый интерфейс VGA (Video Graphics Array). Показана зависимость качества восстановленного изображения от установленной частоты дискретизации SDR-приемника.

Ключевые слова: информационная безопасность, побочные электромагнитные излучения, технические средства, автоматизированная система, программно-аппаратный комплекс, программно-определяемая радиосистема, Software Defined Radio, восстановление ПЭМИ видеотракта

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время проведение исследований, касающихся побочных электромагнитных излучений (ПЭМИ) технических средств, основывается на применении аппаратных комплексов, в основе которых лежат измерительные приемники или анализаторы спектра с набором измерительных антенн. Стоимость данного оборудования достаточно высока, что является препятствием как для исследователей в данной области, так и для построения учебного процесса по данному направлению.

На сегодняшний день успешное развитие радиоустройств под общим названием SDR (Software Defined Radio), или программно-определяемое радио, позволяет говорить о том, что такая техника дает достаточно серьезные возможности для исследователей радиосигналов за умеренную стоимость. Приемник на основе программно-определяемого радио способен сканировать широкий диапазон частот (до 6 ГГц у USRP B210) с полосой пропускания до 56 МГц и стоимостью приемника до 100 долларов, при этом обработка и анализ обнаруженных радиосигналов полностью производится при помощи персонального компьютера, на котором реализовано специальное ПО.

В настоящий момент различными учеными помимо исследований ПЭМИ видеотракта [1–3] проводятся исследования ПЭМИ интерфейса USB [4], лазерных принтеров [5], клавиатур с интерфейсом PS/2 [6] и т. д.

1. ТЕХНИЧЕСКИЙ КАНАЛ УТЕЧКИ ИНФОРМАЦИИ ЗА СЧЕТ ПЭМИ ВИДЕОТРАКТА

Технический канал утечки информации связан с неконтролируемым пространством информативного сигнала через физическую среду до технического средства, осуществляющего перехват информации [7]. Источники ПЭМИ видеотракта включают в себя порт вывода сигнала графического про-

цессора (GPU), кабели передачи видео (VGA, HDMI, DVI, Display Port и т. д.) и внутренние порты дисплея (LVDS и встроенный порт дисплея (eDP)) [8–10]. Основным устройством вывода визуальной информации в персональных компьютерах (ПК) является монитор. Практически все современные мониторы основаны на растровом изображении, это означает, что изображение передается по видеотракту к монитору построчно с определенной тактовой частотой [11].

В работе будем рассматривать интерфейс VGA как наиболее доступный и простой для исследования, но то же самое применимо и к современным цифровым интерфейсам (DVI, HDMI, Display Port).

Представим основные параметры, которые важны для дальнейшей работы.

1. Максимальная разрешающая способность – характеристика, связанная с размером отображаемого изображения. Максимальная разрешающая способность выражается в количестве точек по ширине и высоте отображаемого изображения. Например, для отображаемого изображения в разрешении 1280×1024 максимальная разрешающая способность будет составлять 1 310 720 точек.

2. Частота регенерации или обновления экрана (Гц).

3. Частота горизонтальной развертки монитора – характеристика, показывающая предельное число горизонтальных строк на экране монитора, которое может прочертить электронный луч за одну секунду.

4. Ширина полосы пропускания частот – параметр, характеризующий максимально возможное количество точек, отображаемых на экране за секунду (МГц).

Исследуемый монитор имеет следующие характеристики:

- разрешение экрана 1280×1024 ;
- частота обновления экрана 60 Гц.

Таким образом, требуемая ширина полосы пропускания монитора будет равна $1,05 \times 1024 \times 1280 \times 1,3 \times 60 = 107$ МГц.

2. ТЕХНОЛОГИЯ SDR

Технология SDR (Software Defined Radio, программно-определяемое радио) – это технология, позволяющая с помощью программного обеспечения устанавливать или изменять рабочие радиочастотные параметры приемопередающего устройства.

Функциональная схема SDR (рис. 1) состоит:

– из программной части, предназначенной для выполнения значительной части функций по обработке сигналов и управления аппаратной частью;

– аппаратной части, предназначенной для выполнения функций, недоступных для программной реализации [12].

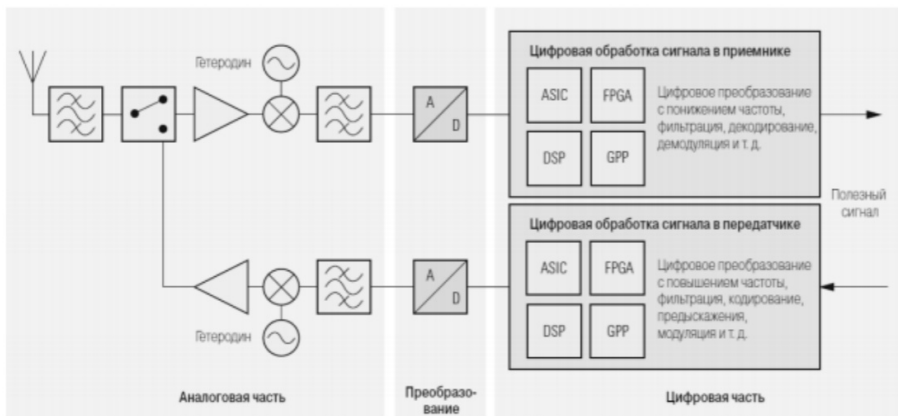


Рис. 1. Функциональная схема SDR

Fig. 1. Functional diagram SDR

Устройство SDR выполнено по модульной архитектуре. Модульная архитектура более гибкая и дает возможность заменять различные модули для достижения оптимальных результатов.

2.1. СИСТЕМА USRP

Для выполнения перехвата видеосигнала было использовано SDR-устройство серии USRP, а именно Ettus USRP B120.

Устройства серии USRP B210 представляют собой компактную и относительно недорогую аппаратную основу для технологии SDR. К достоинствам данного устройства можно отнести непрерывный частотный диапазон от 70 МГц до 6 ГГц, полосу пропускания шириной в 56 МГц, ПЛИС (программируемая логическая интегральная схема) Spartan 6, скоростное подключение USB 3.0 и возможность питания от шины.

Структура устройства USRP в совокупности с ПО GNU Radio представлена на рис. 2. Левый блок на рисунке представляет переднюю часть устройства, в задачи которой входит прием и передача радиосигналов. Верхний путь обозначает путь приема (R_x), нижний путь – путь передачи (T_x). Оба канала могут использоваться независимо друг от друга.

Т а б л и ц а 1

T a b l e 1

Параметры модели USRP B210**USRP B210 model parameters**

Частотный диапазон	70 МГц ... 6 ГГц
Ширина полосы пропускания	До 56 МГц
Разрядность АЦП	12 бит
Частота дискретизации	61,44 МГц
Чипсет	AD 9361
Способ связи	Дуплекс
Количество каналов приема	2
Количество каналов передачи	2
Интерфейс USB	3.0

Средний блок на рис. 2 представляет интерфейс преобразования аналогового сигнала в цифровой и наоборот. Передняя часть устройства подключается к материнской плате USRP, собранной на базе ПЛИС. На материнской плате USRP контроллером интегральной схемы выполняется преобразование аналоговых сигналов в цифровой и их смешивание в основной полосе.

Правый блок (рис. 2) представлен программной частью, реализованной на ПК в среде GNU Radio, где происходит последующая обработка сигнала. Подключение оформлено посредством интерфейса USB 3.0. При активном соединении программной и аппаратной частей система GNU Radio управляет дальнейшим процессом обработки сигналов.

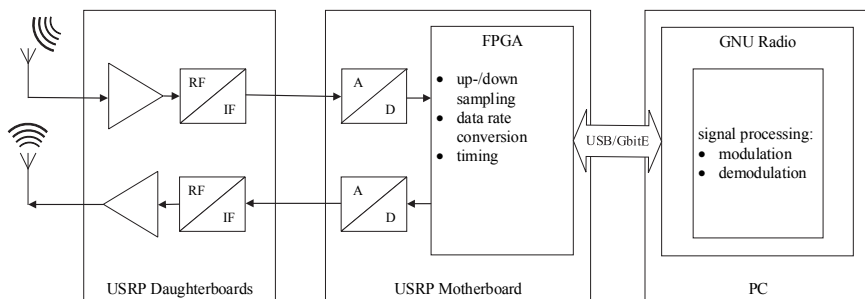


Рис. 2. Архитектура SDR-устройства модели USRP

Fig. 2. USRP SDR device architecture

2.2. GNU RADIO

Для цифровой обработки данных, полученных с SDR-устройства, на компьютере применяется кроссплатформенный программный пакет GNU Radio. Обработка данных производится в режиме реального времени.

Программа построена на модульной основе с учетом парадигмы ООП [13]. Каждый элемент программы является отдельным блоком со своей внутренней логикой. Каждый блок имеет вход и выход для подключения в общую схему, а также набор собственных параметров. Параметры могут задаваться статически (вводом определенного числа) или динамически (вводом переменной или выражений).

На рис. 3 показаны уровни обработки данных в среде GNU Radio.

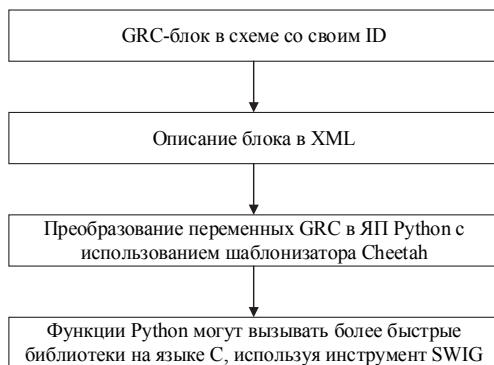


Рис. 3. Путь данных в среде GNU Radio

Fig. 3. GNU Radio data path

Верхний уровень блок-схемы – это уровень графического представления, на котором пользователь собирает функциональную схему. На этом уровне доступно взаимодействие с доступными параметрами блоков и их изменение.

Далее собранную схему необходимо сгенерировать. Система отправляет полученные сведения на следующий уровень, в описание блоков в формате XML.

3. СОСТАВ ПРОГРАММНО-АППАРАТНОГО КОМПЛЕКСА

В проводимом исследовании использовался ЖК-монитор Dell E2214H. Данный дисплей имеет максимальное разрешение экрана 1920×1080 , частоту обновления 60 Гц, а также слоты для подключения DVI-D и VGA интерфейсов. Поскольку в эксперименте сделан акцент на изучение аналогового сигнала,

ла, выберем интерфейс VGA, а также установим разрешение экрана 1280×1024 пикселей, кадровую частоту 60 Гц.

Программное обеспечение, на котором производится обработка получаемого сигнала и демонстрация результата, установлено на ноутбуке с работающей виртуальной машиной под управлением ОС Linux Ubuntu. К нему по интерфейсу USB 3.0 подключено SDR-устройство Ettus USRP B210, которое принимает и оцифровывает сигнал. Выборки сигнала, полученные от аппаратной части SDR, поступают в компьютер и обрабатываются в среде GNU Radio.

При разработке программного обеспечения для обнаружения и восстановления сигналов ПЭМИ видеоинтерфейса используются дополнительные модули, расширяющие базовые возможности GNU Radio, а также драйвер UHD, необходимый для успешного взаимодействия программной и аппаратной частей комплекса.

Таблица 2

Table 2

Характеристики используемых инструментов

Characteristics of the equipment used

Параметры монитора	
Модель	Dell E2214H
Разрешение экрана	1920×1080
Частота обновления	60 Гц
Видеоинтерфейс	VGA
Характеристики ОС хоста	
ОС	Windows 10
Процессор	Intel i5-3570
ОЗУ	10 Гб
Версия USB	3.0
Параметры виртуальной машины	
ОС	Ubuntu 18.04 LTS
Выделенный объем GPU	128 Мб
Выделенный объем ОЗУ	8 Гб
GNU Radio	3.7
UHD-драйвер	3.14.0

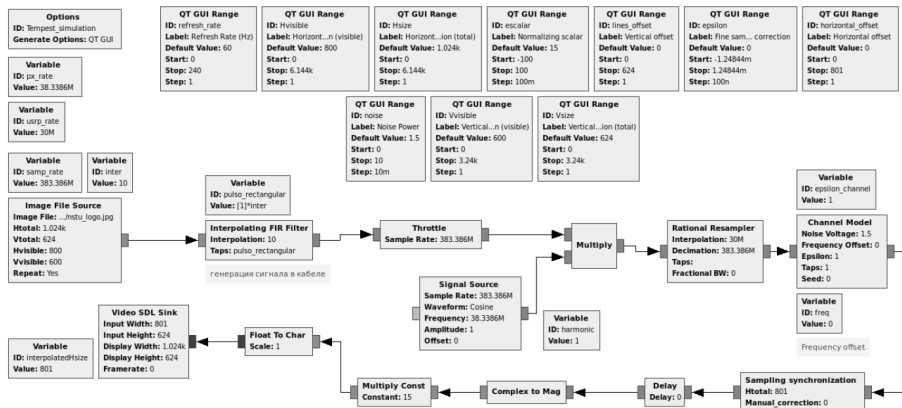


Рис. 5. Имитационная модель в GNU Radio

Fig. 5. Simulation model in GNU Radio

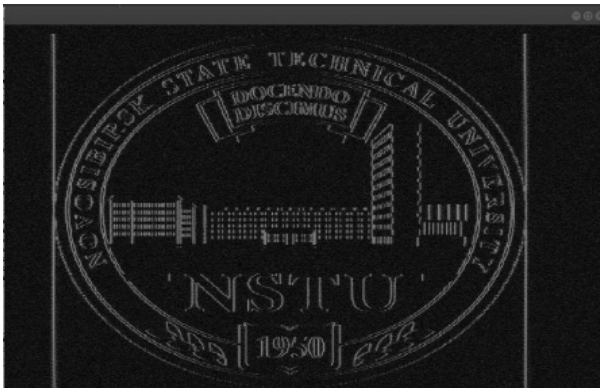


Рис. 6. Результат вывода изображения в имитационной схеме

Fig. 6. The result of displaying an image in the simulation circuit

Для тестирования был выбран классический логотип НГТУ. Результат работы программы показан на рис. 6.

где H – разрешение монитора по высоте; L – разрешение монитора по ширине; $F_{\text{кадр}}$ – частота обновления монитора (кадровая частота).

Для исследуемого монитора имеем значение $H = 1024$, $L = 120$, $F_{\text{кадр}} = 60$ Гц. Коэффициент 1,36 применяется для учета кадровых гасящих импульсов, которые не входят в видимую зону изображения.

Подставив значения в вышеуказанное выражение, получим значение частоты 53,5 МГц. Полученный результат означает, что на этой частоте находится первая гармоника сигнала. Такой же сигнал появится на кратных частотах: 107,0 МГц, 160,4 МГц и т. д.

Следуя вышеуказанной теореме, можно сделать вывод, что частота дискретизации приемника должна быть не менее 107 МГц. Однако максимально возможная частота дискретизации используемого устройства SDR составляет 61,44 МГц, что ниже необходимого значения.

Известно, что в таком случае работает другое правило: чем выше частота дискретизации, тем качественнее изображение мы сможем восстановить.

Для подключения SDR-устройства был выбран интерфейс USB 3.0. Максимальная скорость передачи данных данного интерфейса равна 640 Мб/с. При передаче сигнала в GRC будет записываться комплексный I/Q сигнал 32 бит/с. Поскольку доступный диапазон значений I/Q потока содержится внутри отрезка $[-1.0; 1.0]$, общий вес сигнала составит суммарно 64 бит/с, или 8 байт/с.

Скорость передачи данных от SDR-устройства к ПК можно вычислить, умножив вес одной входящей I/Q выборки на скорость обработки АЦП программного радио.

При выбранных частотах дискретизации (10, 16, 20 МГц) скорость передачи составит 80 Мбайт/с, 128 Мбайт/с и 160 Мбайт/с соответственно. Все эти значения не превышают предельную норму USB 3.0 в 640 Мбайт/с и, следовательно, допустимы для использования в исследовании.

Результаты восстановления сигнала ПЭМИ при частотах дискретизации 20, 16, 10 МГц показаны на рис. 8, 9 и 10 соответственно.

Скриншот рабочего стола исследуемого монитора представлен на рис. 11. На странице документа размещены две похожие буквы – ш и щ, оформленные крупным кеглем. Далее убывающим кеглем представлены русский алфавит и набор строчных гласных букв.

Полученные результаты доказывают, что при частоте дискретизации приемника 20 МГц и выше возможно перехватить довольно качественное и читаемое изображение. Использование интерфейса USB ниже 3.0 приведет к невозможности восстановить изображение достаточного качества для визуализации информации, так как скорость передачи USB 2.0 равна 60 Мбайт/с, что не позволит устанавливать частоту дискретизации выше 10 МГц. А как видно из рис. 10, изображение при частоте дискретизации 10 МГц практически нечитаемое.

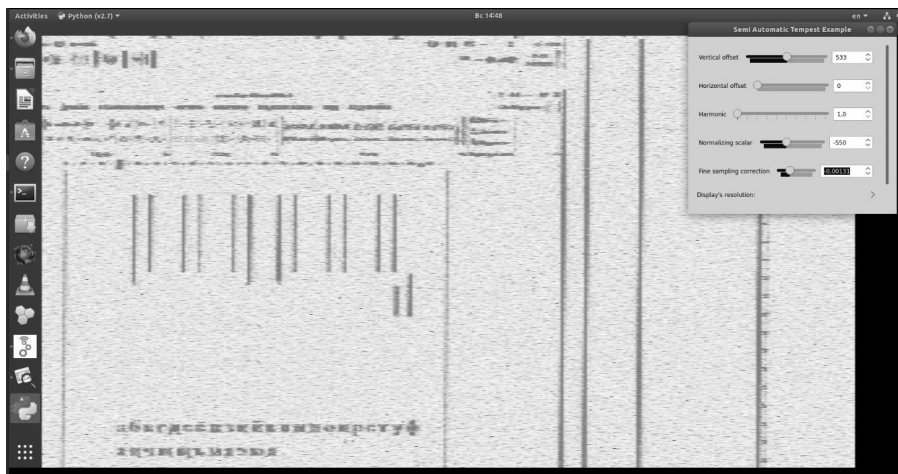


Рис. 8. Результат перехвата изображения с частотой дискретизации 20 МГц

Fig. 8. Image capture result with 20 MHz sampling rate

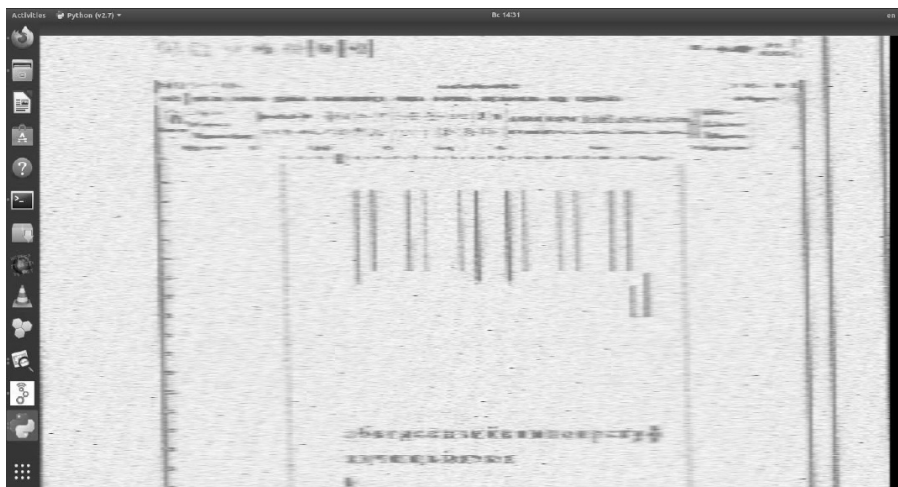


Рис. 9. Результат перехвата изображения с частотой дискретизации 16 МГц

Fig. 9. Image capture result with 16 MHz sampling rate



Рис. 10. Результат перехвата изображения с частотой дискретизации 10 МГц

Fig. 10. Image capture result with 10 MHz sampling rate

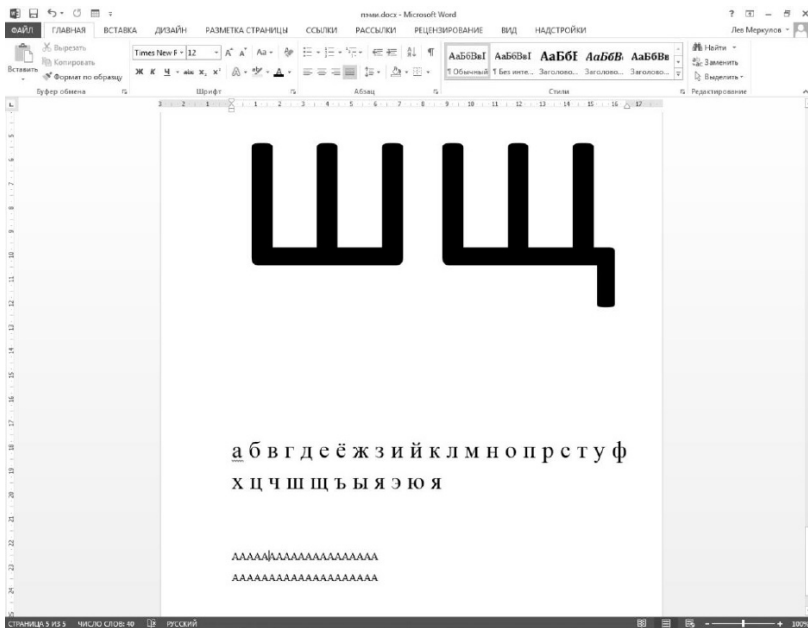


Рис. 11. Снимок рабочего стола исследуемого монитора

Fig. 11. A snapshot of the desktop of the monitor under study

Это показывает, что практическая атака может быть реализуема неподготовленным злоумышленником, не обладающим существенными специальными знаниями и, что также важно, дорогой профессиональной техникой. Более изощренный злоумышленник может использовать лучшее оборудование с более низким уровнем шума и более высоким усилением антенны для проведения такой атаки с большего расстояния.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

ПЭМИ видеотракта – это реальная угроза, которая существует с тех пор, как впервые были использованы мониторы. Рассмотренная в настоящей работе проблема VGA интерфейса не является исчерпывающей. На сегодняшний день известны случаи перехвата не только сигналов аналогового интерфейса, но и сигналов цифровых интерфейсов, например интерфейса HDMI [14] и DVI [15].

Текущий проект продемонстрировал, что практическая атака является жизнеспособной, и при этом злоумышленник обязательно должен иметь какие-либо предварительные знания о цели, и что развитие средств приема и обработки информации (в данном случае появление SDR-приемников) приводит к снижению стоимости затрат на реализацию подобных проектов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Meulemeester P. De, Scheers B., Vandenbosch G.A.E.* A quantitative approach to eavesdrop video display systems exploiting multiple electromagnetic leakage channels // *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*. – 2020. – Vol. 62 (3). – P. 663–672.
2. *Meulemeester P. De, Scheers B., Vandenbosch G.A.E.* Eavesdropping a (ultra-)high-definition video display from an 80 meter distance under realistic circumstances // *2020 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility and Signal/Power Integrity (EMCSI)*. – IEEE, 2020. – P. 517–522. – DOI: 10.1109/EMCSI38923.2020.9191457.
3. *Sayakkara A., Le-Khac N.-A., Scanlon M.* Accuracy enhancement of electromagnetic side-channel attacks on computer monitors // *ARES 2018: Proceedings of the 13th International Conference on Availability, Reliability and Security*. – ACM, 2018. – Art. 15. – P. 1–9. – DOI: 10.1145/3230833.3234690.

4. Compromising electromagnetic emanations of USB mass storage devices / A. Boitan, S. Halunga, V. Bîndar, O. Fratu // *Wireless Personal Communications*. – 2020. – P. 1–26.
5. Ulaş C., Aşık U., Karadeniz C. Analysis and reconstruction of laser printer information leakages in the media of electromagnetic radiation, power, and signal lines // *Computers and Security*. – 2016. – Vol. 58. – P. 250–267. – DOI: 10.1016/j.cose.2016.02.001.
6. Study of compromising emissions of ps/2 keyboards by correlative methods / X.-I. Rognean, G. Rosu, A. Boitan, B. Trip, V. Butnariu, C. Kasmi, L.O. Fichte, O. Baltag // *Revue Roumaine des Sciences Techniques. Serie Electrotechnique et Energetique*. – 2020. – N 65. – P. 15–20.
7. Хорев А.А. Технические каналы утечки информации, обрабатываемой техническими средствами // *Специальная техника*. – 2004. – № 2. – С. 39–57. – URL: <http://www.bnti.ru/showart.asp?aid=954&l-vl=4.03> (дата обращения: 06.12.2021).
8. Kuhn M.G. Compromising emanations: eavesdropping risks of computer displays. – Cambridge, 2003. – (Technical report / University of Cambridge, Computer Laboratory; no. 577).
9. Sekiguchi H., Seto S. Proposal of an information signal measurement method in display image contained in electromagnetic noise emanated from a personal computer // 2008 IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference. – IEEE, 2008. – P. 1859–1863. – DOI: 10.1109/IMTC.2008.4547348.
10. Kuhn M.G. Compromising emanations of LCD TV sets // *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*. – 2013. – Vol. 55 (3). – P. 564–570.
11. Marinov M. Remote video eavesdropping using a software-defined radio platform: M.Phil in Advanced Computer Science / University of Cambridge, Computer Laboratory. – Cambridge, 2014. – 68 p.
12. Силин А. Технология Software Defined Radio: теория, принципы и примеры аппаратных платформ // *Беспроводные технологии*. – 2007. – № 2. – URL: <https://wireless-e.ru/gsm/software-defined-radio/> (дата обращения: 07.12.2021).
13. GNU Radio. Guided tutorial introduction: website. – URL: https://wiki.gnuradio.org/index.php/Guided_Tutorial_Introduction (accessed: 07.12.2021).
14. Wang S., Qiu Y., Tian J. Method for evaluating digital video electromagnetic information leakage from video cable // *Chinese Journal of Electronics*. – 2021. – Vol. 30 (5). – P. 978–985. – DOI: 10.1049/cje.2021.07.009.
15. Kubiak I., Przybysz A. DVI (HDMI) and DisplayPort digital video interfaces in electromagnetic eavesdropping process // 2019 International Symposium on Electromagnetic Compatibility – EMC EUROPE. – IEEE, 2019. – P. 338–393. – DOI: 10.1109/EMCEurope.2019.8872097.

Иванов Андрей Валерьевич, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой защиты информации Новосибирского государственного технического университета. Область научных интересов – техническая защита информации. E-mail: andrej.ivanov@corp.nstu.ru

Огнев Игорь Александрович, аспирант кафедры защиты информации Новосибирского государственного технического университета. Основное направление научных исследований – применение технологии SDR в информационной безопасности. E-mail: i.ognev.2016@corp.nstu.ru

Никитина Елизавета Евгеньевна, аспирант кафедры защиты информации Новосибирского государственного технического университета. Основное направление научных исследований – применение технологии SDR в информационной безопасности. E-mail: lizanikitinasj@gmail.com

Меркулов Лев Владимирович, магистрант кафедры технологий испытаний и эксплуатации Московского авиационного института. Основное направление научных исследований – восстановление сигналов ПЭМИ с применением технологии SDR. E-mail: Levmerkulov1@yandex.ru

DOI: 10.17212/2782-2230-2021-4-72-90

Application of SDR (Software Defined Radio) technology for recovery of signals of side electromagnetic radiation of video tract*

A.V. Ivanov¹, I.A. Ognev², E.E. Nikitina³, L.V. Merkulov⁴

¹ *Novosibirsk State Technical University, 20 Karl Marx Avenue, Novosibirsk, 630073, Russian Federation, PhD in Technology, head of the Information Security Department. E-mail: andrej.ivanov@corp.nstu.ru*

² *Novosibirsk State Technical University, 20 Karl Marx Avenue, Novosibirsk, 630073, Russian Federation, graduate student of Information Security Department. E-mail: i.ognev.2016@corp.nstu.ru*

³ *Novosibirsk State Technical University, 20 Karl Marx Avenue, Novosibirsk, 630073, Russian Federation, graduate student of Information Security Department. E-mail: lizanikitinasj@gmail.com*

⁴ *Moscow Aviation Institute, Volokolamskoe highway, 4, Moscow, 125993, Russian Federation, master's student of Test and Operation Technology Department. E-mail: Levmerkulov1@yandex.ru*

This article presents the results of recovering signals of spurious electromagnetic radiation of a video path using an SDR receiver. This work demonstrates the existence of a potential risk of leakage of confidential information through a technical channel of information leakage due to spurious electromagnetic radiation of a video path, bypassing traditional cryptographic and

* Received 31 October 2021.

physical methods of information protection. An attack can be carried out by an attacker without special technical knowledge and special professional expensive equipment. The presented stand makes it possible to simplify research related to spurious electromagnetic radiation, as well as to apply this technology to build a learning process in this domain. In the course of the work, a description of the concept of a technical channel of information leakage and a brief description of the side electromagnetic radiation of the video path are given. The following briefly describes the SDR technology, the selected USRP B210 receiver, and the cross-platform open source GNU Radio software package. The demonstration stand is described in detail and the results of image reconstruction are given. In addition, two stages of the development of a demonstration stand are considered: using a simulation signal and a real intercepted signal. A demonstration stand with simulation signals serves to develop a user's understanding of the properties of spurious electromagnetic radiation, as well as possible obstacles to converting an intercepted signal into an image. The studies of the real intercepted signal were carried out on a monitor with a set resolution of 1280×1024 and a screen refresh rate of 60 Hz. An analog VGA (Video Graphics Array) interface was used to connect the monitor. The dependence of the quality of the reconstructed image on the set sampling frequency of the SDR receiver is shown.

Keywords: information security, side electromagnetic radiation, technical devices, automated system, software and hardware complex, Software Defined Radio system, Software Defined Radio, recovery compromising radiation

REFERENCES

1. Meulemeester P. De, Scheers B., Vandenbosch G.A.E. A quantitative approach to eavesdrop video display systems exploiting multiple electromagnetic leakage channels. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2020, vol. 62 (3), pp. 663–672.
2. Meulemeester P. De, Scheers B., Vandenbosch G.A.E. Eavesdropping a (ultra-)high-definition video display from an 80 meter distance under realistic circumstances. *2020 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility and Signal/Power Integrity (EMCSI)*. IEEE, 2020, pp. 517–522. DOI: 10.1109/EMCSI38923.2020.9191457.
3. Sayakkara A., Le-Khac N.-A., Scanlon M. Accuracy enhancement of electromagnetic side-channel attacks on computer monitors. *ARES 2018: Proceedings of the 13th International Conference on Availability, Reliability and Security*. ACM, 2018, art. 15, pp. 1–9. DOI: 10.1145/3230833.3234690.
4. Boitan A., Halunga S., Bindar V., Fratu O. Compromising electromagnetic emanations of USB mass storage devices. *Wireless Personal Communications*, 2020, pp. 1–26.
5. Ulaş C., Aşık U., Karadeniz C. Analysis and reconstruction of laser printer information leakages in the media of electromagnetic radiation, power, and signal lines. *Computers and Security*, 2016, vol. 58, pp. 250–267. DOI: 10.1016/j.cose.2016.02.001.

6. Rognean X.-I., Rosu G., Boitan A., Trip B., Butnariu V., Kasmi C., Fichte L.O., Baltag O. Study of compromising emissions of ps/2 keyboards by correlative methods. *Revue Roumaine des Sciences Techniques. Serie Electrotechnique et Energetique*, 2020, no. 65, pp. 15–20.
7. Khorev A.A. Tekhnicheskie kanaly utechki informatsii, obrabatyvaemoi sredstvami vychislitel'noi tekhniki [Technical channels of computer-processed information leakage]. *Spetsial'naya tekhnika = Special Equipment*, 2010, no. 2, pp. 39–57. Available at: <http://www.bnti.ru/showart.asp?aid=954&l-vl=4.03> (accessed 06.12.2021).
8. Kuhn M.G. *Compromising emanations: eavesdropping risks of computer displays*. Cambridge, 2003. University of Cambridge, Computer Laboratory. Technical report, no. 577.
9. Sekiguchi H., Seto S. Proposal of an information signal measurement method in display image contained in electromagnetic noise emanated from a personal computer. *2008 IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference*. IEEE, 2008, pp. 1859–1863. DOI: 10.1109/IMTC.2008.4547348.
10. Kuhn M.G. Compromising emanations of LCD TV sets. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2013, vol. 55 (3), pp. 564–570.
11. Marinov M. *Remote video eavesdropping using a software-defined radio platform*. M.Phil in Advanced Computer Science. University of Cambridge, Computer Laboratory, 2014. 68 p.
12. Silin A. Tekhnologiya Software Defined Radio: teoriya, printsipy i primery apparatnykh platform [Software Defined Radio technology. Theory, principles and examples of hardware platforms]. *Besprovodnye tekhnologii = Wireless Technologies*, 2007, no. 2. Available at: <https://wireless-e.ru/gsm/software-defined-radio/> (accessed 07.12.2021).
13. *GNU Radio. Guided tutorial introduction*. Website. Available at: https://wiki.gnuradio.org/index.php/Guided_Tutorial_Introduction (accessed 07.12.2021).
14. Wang S., Qiu Y., Tian J. Method for evaluating digital video electromagnetic information leakage from video cable. *Chinese Journal of Electronics*, 2021, vol. 30 (5), pp. 978–985. DOI: 10.1049/cje.2021.07.009.
15. Kubiak I., Przybysz A. DVI (HDMI) and DisplayPort digital video interfaces in electromagnetic eavesdropping process. *2019 International Symposium on Electromagnetic Compatibility – EMC EUROPE*. IEEE, 2019, pp. 338–393. DOI: 10.1109/EMCEurope.2019.8872097.

Для цитирования:

Применение технологии SDR (Software Defined Radio) для восстановления сигналов побочных электромагнитных излучений видеотракта / А.В. Иванов, И.А. Огнев, Е.Е. Никитина, Л.В. Меркулов // Безопасность цифровых технологий. – 2021. – № 4 (103). – С. 72–90. – DOI: 10.17212/2782-2230-2021-4-72-90.

For citation:

Ivanov A.V., Ognev I.A., Nikitina E.E., Merkulov L.V. *Primenenie tekhnologii SDR (Software Defined Radio) dlya vosstanovleniya signalov pobochnykh elektromagnitnykh izlucheniya videotrakta* [Application of SDR (Software Defined Radio) technology for recovery of signals of side electromagnetic radiation of video tract]. *Bezopasnost' tsifrovyykh tekhnologii = Digital Technology Security*, 2021, no. 4 (103), pp. 72–90. DOI: 10.17212/2782-2230-2021-4-72-90.