

УДК: 621.396.96 + 004.738.5 + 621.391.8

DOI: 10.26907/rwp29.2025.379-382

ШИРОКОПОЛОСНЫЙ РАДИОКАНАЛ С РАЗНЕСЁННЫМ ПРИЁМОМ НА ОСНОВЕ ISM-ТРАНСИВЕРОВ

И.И. Шамсутдинов, Е.Ю. Рябченко

Казанский федеральный университет, 420008, г. Казань, ул. Кремлёвская, 18

E-mail: shamsutdin.sham@mail.ru

Аннотация. Рассматриваются практические аспекты реализации широкополосного симплексного радиоканала с пространственно-разнесённым приёмом пакетов на основе самых распространённых трансиверов стандарта IEEE 802.11n в ISM-диапазонах 2.4 ГГц и 5.2–5.8 ГГц. Предложенный способ позволяет передавать данные, в том числе видеопоток, в реальном времени с практической скоростью до 10 Мбит/с на расстоянии нескольких километров в условиях многолучёвости.

Ключевые слова: Wi-Fi; разнесённый приём; симплексный канал передачи данных.

BROADBAND RADIO CHANNEL WITH DIVERSITY RECEPTION BASED ON ISM TRANSCEIVERS

I.I. Shamsutdinov, E.Yu. Ryabchenko

Abstract. Practical aspects of the implementation of a broadband simplex radio channel with spatially spaced reception based on the most common IEEE 802.11n standard transceivers in the 2.4 GHz and 5.2–5.8 GHz ISM bands are considered. The proposed method allows transmitting data, including a video stream, in real time at a practical speed of up to 10 Mbit/s over a distance of several kilometers in multipath conditions.

Keywords: Wi-Fi; spatially spaced reception; simplex data transmission channel.

Введение

Современные беспроводные технологии, такие как Wi-Fi различных стандартов IEEE 802.11a/b/g/n, изначально разрабатывались для высокоскоростной передачи данных в локальных сетях (WLAN). Однако, возможности некоторых ISM-трансиверов, позволяют использовать их для построения радиоканалов связи в несколько километров. Пропускная способность данных устройств, заложенная в стандарте, делает возможным их применение, например, для передачи телеметрии и мультимедийных данных, но при этом возникает задача обеспечения соответствующей надёжности канала.

Важной проблемой при построении дуплексного канала передачи данных на базе Wi-Fi является относительно высокий процент потерь пакетов (PER), а также наличие обратного трафика. Данное обстоятельство плохо влияет на мультимедийные данные, передающиеся в реальном времени: вследствие повторной передачи могут возникать нежелательные задержки.

Одним из ключевых подходов к увеличению надёжности каналов связи является применение пространственно-разнесённого приёма. Этот метод особенно актуален в условиях многолучевого распространения сигналов и интерференции. Например, в проекте OpenHD используется оригинальный стек протоколов, обеспечивающий динамическое перераспределение трафика между устройствами и каналами на основе оценки качества связи в реальном времени [1].

Вторым простым решением проблемы потери пакетов является их дублирование. Метод повторной передачи пакетов эффективно компенсирует потери данных в Wi-Fi каналах, благодаря высокой пропускной способности трансиверов. Также данный метод хорошо подходит для применения в симплексном канале связи, в котором нет обратного трафика.

Таким образом, разработка практических методов организации симплексных радиоканалов на массовых ISM-трансиверах с разнесённым приёмом и другими методами компенсации ошибок представляет интерес для практической радиосвязи.

Особенности ISM-трансиверов и передачи данных в режиме мониторинга

Многие Wi-Fi адаптеры поддерживают особый режим работы, называемый *режимом мониторинга*, который позволяет сканировать выбранный канал и перехватывать управляющие кадры стандарта 802.11 и кадры с данными от соседних сетей, а некоторые адаптеры (Atheros,

Realtek, Mediatek, Ralink [2]), находясь в данном режиме, могут передавать произвольные данные по выбранному каналу.

Основное предназначение режима мониторинга – это тестирование безопасности и диагностика Wi-Fi сети. Ключевые особенности режима мониторинга:

1. Полный контроль над формированием кадра из прикладного уровня.
2. Не нужна ассоциация с точкой доступа. Адаптер, который находится в режиме мониторинга, не отправляет управляющие кадры, оставаясь «невидимым».
3. Сканирование может выполняться во всех диапазонах, поддерживаемых Wi-Fi адаптером, в том числе 2.4 ГГц (каналы 1–14), 5 ГГц (каналы 36–177).
4. Отсутствует фильтрация MAC-адресов.

Таким образом, отсутствие необходимости ассоциации с точкой доступа и возможность принимать и передавать произвольные пакеты позволяет использовать Wi-Fi адаптеры, находящиеся в режиме мониторинга, для реализации симплексного канала передачи данных, однако требует учёта некоторых архитектурных ограничений и особенностей конкретных микросхем и их драйверов.

Для исследования были выбраны распространённые Wi-Fi адаптеры с трансиверами RTL8812bu, RTL8821cu, MT7601, RT5372 с интерфейсом USB. В таблице 1 приведена практически определённая чувствительность данных устройств.

Таблица 1. Чувствительность микросхем при скорости передатчика 6,5 Мбит/с для PER < 10 %, ширина канала 20 МГц

№	Трансивер	Чувствительность, дБм	
		Канал №10 (2457 МГц)	Канал №140 (5700 МГц)
1	RTL8812bu	-90	-91,5
2	RTL8821cu	-92	-92
3	MT7601	-84	Не поддерживает
4	RT5372	-87	Не поддерживает

Для дальнейших экспериментов адаптеры с трансивером RTL8821cu были выбраны в качестве приёмников из-за более высокой чувствительности в диапазоне 2,4 ГГц, а в качестве передатчика использовался адаптер с трансивером RTL8812bu. В таблице 2 приведены некоторые характеристики RTL8812bu в режиме мониторинга.

Таблица 2. Характеристики USB-адаптера с RTL8812bu в режиме мониторинга

MCS	Скорость передачи, Мбит/с	Максимальная выходная мощность, дБм	Тип модуляции
0	6.5	17	BPSK
1	12	16,5	QPSK
2	19	13,5	QPSK
3	24.5	13	16-QAM
4	28	13	16-QAM
5	33	11	64-QAM

Схема передачи пакетов через Wi-Fi адаптер с RTL8812bu в режиме мониторинга в ОС Linux и их формат приведены на рисунке 1.



Рис. 1. Передача данных от прикладного уровня в Wi-Fi адаптер в режиме мониторинга и формат пакета

Для работы с трансивером RTL8812bu в исследовании использовался драйвер ОС Linux 88x2bu_ohd, доработанный сообществом OpenHD. Он позволяет переводить адаптер в режим мониторинга, осуществлять передачу пакетов, изменять мощность, частотный канал и скорость передачи данных.

Данные для отправки должны быть снабжены специальным заголовком Radiotap. Заголовок Radiotap – это механизм для предоставления дополнительной информации о кадрах из драйвера в пользовательские приложения, и из пользовательского приложения в драйвер [3]. В отличие от стандартных заголовков, он содержит метаданные физического уровня, критичные для диагностики радиоканала. Radiotap использует модульную структуру с обязательными и опциональными полями. Модуль ядра ОС Linux 88x2bu_ohd поддерживает работу с заголовком Radiotap, благодаря этому можно менять MCS (Modulation and Coding Scheme) другие параметры передатчика.

После заголовка Radiotap следует стандартный заголовок IEEE 802.11 (заголовок кадра Wi-Fi [4]). Его структура варьируется в зависимости от типа кадра (управляющий, контрольный, данные), но базовый формат включает ключевые элементы: управляющий блок, поля адресов и др.

Вышеописанные заголовки являются обязательными для передачи пакета в режиме мониторинга, после них могут идти полезные данные, которые в свою очередь тоже могут содержать заголовки прикладного уровня, например, заголовок Custom, в котором указывается номер передаваемого фрагмента, тип трафика и метка начала полезной нагрузки.

Реализация канала с разнесённым приёмом на ISM-трансиверах

Работоспособность радиоканала была проверена на трассе с дистанцией в 10 км. В качестве источника трафика использовалась IP-камера. Было разработано программное обеспечение, которое на стороне передатчика переводит Wi-Fi адаптер в режим мониторинга, захватывает кадры с IP-камеры, инкапсулирует их в пакеты правильного формата и дублирует при необходимости. На стороне приёмника ПО выполняет распаковку принятых пакетов и проверку корректности последовательности кадров по номеру пакета из заголовка.

Проведено сравнение вероятности потери пакетов (PER) при раздельном приёме на адаптеры и при пространственно-разнесённом приёме пакетов на два адаптера и на три адаптера при наличии помех от других точек доступа. В таблице 3 приведены результаты измерения PER, антенны адаптеров были разнесены на расстояние большее длины волны (30 см).

Таблица 3. Результаты эксперимента с разнесённым приёмом пакетов

Количество приёмников	PER, %	Частотный канал	Пропускная способность, Мбит/с
1	15	10 (2457 МГц)	12
2	8		
3	5		

Реализованный метод не является полноценным пространственно-разнесённым приёмом, так как разнесённый приём (как в MIMO) предполагает согласованное сложение сигналов [5]. Однако, как видно из таблицы 3, данная реализация также позволяет существенно сократить вероятность потери пакета в канале с помехами.

Так как трафик с камеры составлял примерно 2,7 Мбит/с, а пропускная способность симплексного канала 12 Мбит/с, для дальнейшего уменьшения процента потерянных пакетов было решено применить дублирование кадров совместно с пространственным разнесением приёмников. Результаты эксперимента приведены в таблице 4. В данном эксперименте использовалось два приёмника.

Таблица 4. Результаты эксперимента с разнесённым приёмом и дублированием кадров

Попытки отправки кадров	PER, %	Канал Wi-Fi	Пропускная способность, Мбит/с
2	4	10 (2457 МГц)	12 Мбит/с
3	2		

Был проведён эксперимент с передачей данных на расстояние в 10 км. Бюджет данного радиоканала приведён в таблице 5. Для компенсации потерь пакетов применялся приём на два адаптера совместно с дублированием кадров.

Таблица 5. Бюджет радиолинии

Передатчик	Значение	Приёмники	Значение
Выходная мощность	31 дБм	Чувствительность	- 90 дБм
Потери в кабеле	-1,2 дБ	Потери в кабеле	-1,2 дБ
Коэффициент усиления антенны	12 дБи	Коэффициент усиления антенны	12 дБи
ЭИИМ (EIRP)	42,8 дБм	Уровень сигнала	-79 дБ

Заключение

Таким образом, Wi-Fi адаптеры на основе распространённых трансиверов стандарта IEEE 802.11n в режиме мониторинга могут быть применены для создания канала связи с дальностью порядка 10 км и более (в зависимости от параметров усиления и антенн) и высокой пропускной способностью порядка 10–20 Мбит/с.

Пространственно-разнесённый приём на два адаптера позволяет снизить PER на величину порядка 10 %. Дублирование пакетов при передаче позволяет уменьшить PER еще на 2–5 %.

Список литературы

1. Digital OpenSource FPV System. Интернет-сайт с материалами и исходным кодом проекта OpenHD. – URL: <https://openhdfpv.org> (дата обращения: 06.03.2025).
2. Zubow A., Sombrutzki R. A Low-cost MIMO Mesh Testbed based on 802.11n // IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC). – April 2012. – P. 3171–3176.
3. Radiotap: Wireless LAN monitoring and analysis. – URL: <http://www.radiotap.org/projects/> (дата обращения: 04.06.2025).
4. IEEE P802.11/D11.0. Draft STANDARD for Information Technology – Telecommunications and information exchange between systems – Local and metropolitan area networks – Specific requirements. Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications. Amendment 5: Enhancements for Higher Throughput. – Июнь 2009. – URL: https://people.iith.ac.in/tbr/teaching/docs/802.11n-DraftStd_June2009.pdf (дата обращения: 08.04.2025).
5. Ипатов В. Широкополосные системы и кодовое разделение сигналов. – М.: Техносфера, 2007. – 488 с.