

ОСОБЕННОСТИ ИСПЫТАНИЙ ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ СЕМЕЙСТВА WI-FI 5 И WI-FI 6

Пилипенко П.С.

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь

Листопад Н.И. – доктор технических наук

В работе рассмотрены метрологические аспекты верификации оборудования стандартов *IEEE 802.11ac (Wi-Fi 5)* и *IEEE 802.11ax (Wi-Fi 6)*. Проанализированы ключевые технологические отличия, влияющие на процедуру испытаний: переход к *OFDMA*, модуляция *1024-QAM* и технологии пространственного мультиплексирования. Обоснован состав измерительного комплекса на базе полубезэховой камеры *Frankonia SAC-3PLUS*, анализатора сигналов *R&S FSW26* и антенн *ETS 3115*. Предложена структурная схема автоматизированного измерительного комплекса для сертификационных испытаний в соответствии с требованиями СТБ 1788-2024.

Современный этап развития беспроводных технологий характеризуется переходом к высокоплотным сетям, где определяющим фактором становится не пиковая скорость одного устройства, а суммарная ёмкость системы. Стандарт *IEEE 802.11ax (Wi-Fi 6)* внедрил технологию многостанционного доступа с частотным разделением каналов (*OFDMA*), позволяющую точке доступа одновременно обслуживать десятки клиентов в рамках одного временного интервала. Однако усложнение физического уровня сигналов, использование модуляции сверхвысокого порядка *1024-QAM* и многопользовательских конфигураций *MIMO* предъявляют принципиально новые требования к метрологическому обеспечению. Актуальность работы обусловлена введением в действие государственного стандарта СТБ 1788-2024, устанавливающего жесткие нормы к параметрам радиоизлучения широкополосного оборудования в Республике Беларусь.

Ключевым отличием *Wi-Fi 6* от предыдущего поколения является замена метода *OFDM* на *OFDMA*. Физический смысл перехода заключается в дроблении широкого канала на множество независимых поднесущих – ресурсных единиц (*Resource Units, RU*). Это позволяет верифицировать параметры не всего канала целиком, а каждой отдельной ресурсной единицы. Другим критическим параметром является амплитуда вектора ошибки (*EVM*). Для успешной работы модуляции *1024-QAM* требуемое значение *EVM* должно составлять не менее -35 дБ, что накладывает жесткие ограничения на линейность усилителей мощности испытываемого устройства и требует использования анализаторов сигналов с собственным *EVM* не хуже -45 дБ.

Проведение высокоточных измерений параметров *Wi-Fi 5/6* принципиально невозможно в условиях обычных лабораторных помещений из-за эффектов многолучевого распространения и внешних помех. Для обеспечения электромагнитной чистоты в работе обосновано применение полубезэховой камеры *Frankonia SAC-3PLUS*. Камера обеспечивает ослабление внешних полей более чем на 100 дБ в диапазоне до 18 ГГц за счет гибридных поглотителей *Frankosorb*. Внутри камеры сформирована «тихая зона» диаметром 2,0 метра, где отклонение параметров поля от идеального минимально. Для измерения напряженности поля в диапазоне 2,4 и 5 ГГц используется двухребневая рупорная антенна *ETS-Lindgren 3115*, обладающая стабильным фазовым центром и кросс-поляризационной развязкой.

Центральным элементом измерительного комплекса является анализатор сигналов *Rohde & Schwarz FSW26*. Данный прибор обеспечивает векторный анализ сигналов (*VSA*) с полосой пропускания до 160 МГц, что необходимо для захвата широкополосных сигналов *Wi-Fi 6*. Собственное значение *EVM* анализатора составляет -45 дБ, что создает необходимый метрологический запас при тестировании устройств с модуляцией *1024-QAM*. Многооконный интерфейс прибора позволяет одновременно отображать спектральную маску, *I/Q*-диаграмму и таблицу численных значений параметров модуляции, что дает возможность мгновенно локализовать искажения сигнала.

Для компенсации потерь в длинном СВЧ-тракте (10–12 метров) в состав измерительной системы включен малошумящий усилитель (МШУ) *AD010180-25/80-2* с коэффициентом шума менее 2,5 дБ. Усилитель устанавливается непосредственно за приемной антенной, что позволяет поднять уровень полезного сигнала над шумовой полкой анализатора и обеспечить динамический диапазон более 80 дБ. Это критически важно для обнаружения внеполосных и побочных излучений, уровни которых согласно СТБ 1788-2024 могут составлять десятки децибел ниже основного сигнала.

На основе проведенного анализа разработана структурная схема измерительного комплекса, разделенная на два сегмента: внутренний (размещенный в объеме безэховой камеры) и внешний (аппаратный комплекс управления). Испытуемое устройство устанавливается на прецизионный поворотный стол из радиопрозрачного материала. Управление поворотным устройством, антенной мачтой и анализатором сигналов интегрировано в единую программную среду через интерфейсы *LAN/GPIB*. Автоматизация процесса позволяет сканировать диаграмму направленности с шагом до 1

градуса и рассчитывать эквивалентную изотропно-излучаемую мощность (ЭИИМ) с учетом всех поправочных коэффициентов.

Методологической основой испытаний выступает метод замещения, признанный наиболее достоверным для измерения ЭИИМ в условиях безэховых камер. Особое внимание уделяется расчету бюджета неопределенности измерений, включающему погрешность калибровки антенн, неравномерность «тихой зоны» камеры, нестабильность коэффициента передачи МШУ и погрешности рассогласования в тракте. Расширенная неопределенность рассчитывается с коэффициентом охвата $k=2$ (доверительная вероятность 95%). Разработанная методика верификации прошла апробацию на образцах оборудования *Wi-Fi 5* и *Wi-Fi 6*.