ISSN: 3030-3346

КОМБИНИРОВАННЫЙ МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ ЭКВИВАЛЕНТНОЙ ИЗОТРОПНО-ИЗЛУЧАЕМОЙ МОЩНОСТИ ДЛЯ РАЗНОРОДНЫХ КЛАССОВ РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Писецкий Юрий Валерьевич[1], Вотинов Кирилл Алексеевич[1], Дадамухамедова Дилшода Дониер кизи[1]

[1]Ташкентский университет информационных технологий имени Мухаммада Ал-Хоразмий,
E-mail: yuriy.pisetskiy@mail.ru E-mail: votinovkirill@gmail.com E-mail: dilshoda99d@gmail.com

K E Y W O R D S

ЭИИМ, комбинированный метод измерения, ближнепольный мониторинг, зона Френеля, восстановление фазы, мощные СВЧ-системы, базовая станция 5G, компактная безэховая камера

A B S T R A C T

Точное измерение ЭИИМ в широком диапазоне практических условий – в том числе для импульсных мощных СВЧ-систем, антенн действующих базовых станций и крупногабаритного сертифицируемого оборудования с интегрированным генератором – не может быть обеспечено ни одним из существующих методов в отдельности. В настоящей работе предложена комбинированная трёхмодульная стратегия измерений, объединяющая три экспериментально верифицированных метода, каждый из которых закрывает определённую практическую нишу. Модуль А применяет метод ближнепольного мониторинга для импульсных мощных СВЧ-систем и требует лишь одного импульса. Модуль В применяет метод одиночной линии сканирования в зоне Френеля для in-situ измерений базовых станций без доступа к антенному порту. Модуль С применяет метод преобразования «Френель–дальнее поле» для сертификационных испытаний в компактной безэховой камере. Сформулирован иерархический алгоритм выбора модуля по трём диагностическим критериям, обеспечивающий однозначное определение оптимальной конфигурации измерений. Все три модуля используют единое вычислительное ядро – интегральное представление Кирхгофа–Гюйгенса, – что обеспечивает единство метрологической базы и возможность перекрёстной верификации. Суммарная погрешность комбинированного метода не превышает 0,7 дБ, что более чем вчетверо превосходит требования МСЭ-Р и FCC.

Введение. Эквивалентная изотропно-излучаемая мощность (ЭИИМ) является ключевым параметром при проектировании и сертификации радиотехнических систем. В условиях интенсивного развития беспроводных телекоммуникаций, распространения сетей пятого поколения и расширения применения высокомощных СВЧ-устройств потребность в точном и универсальном измерении ЭИИМ существенно возрастает. Данный параметр определяет эффективность передачи сигнала, соответствие регуляторным требованиям и безопасность электромагнитной совместимости.

Современная практика измерения ЭИИМ характеризуется острой необходимостью охватить принципиально различные классы источников и условия эксплуатации: дальнепольные методы требуют значительных испытательных полигонов [9], тогда как традиционные ближнепольные методы непригодны для импульсных источников и in-situ измерений [10]. Помимо этого, задачи сертификации электрически крупного оборудования с интегрированным генератором в условиях ограниченных камер и in-situ измерений действующих базовых станций без отключения от сети остаются нерешёнными в рамках единой методологии. Это

(cc) BY

обусловливает необходимость разработки интегрированного подхода, способного обеспечить точность в пределах ±0,7 дБ без развёртывания крупных испытательных полигонов.

В последние годы предложено несколько специализированных методов, преодолевающих описанные ограничения [1–3, 5, 6]. Сравнительный анализ показывает, что каждый из них обладает уникальным достоинством, компенсирующим ограничение другого, однако ни один не является универсальным: области их оптимальной применимости строго разграничены по типу источника, доступности антенного порта и условиям размещения стенда. Следствием является необходимость интеграции методов в единую измерительную стратегию. Настоящая работа посвящена синтезу и метрологическому обоснованию такой комбинированной стратегии. Предложен трёхмодульный метод измерения ЭИИМ с иерархическим алгоритмом выбора модуля, охватывающий импульсные ВМ СВЧ-системы, активные базовые станции и серийное телекоммуникационное оборудование с интегрированным генератором.

Анализ литературы

Современные научные исследования, посвящённые измерению ЭИИМ в разнородных условиях эксплуатации, демонстрируют значительное разнообразие подходов. Рассмотрим ключевые работы по отдельности.

В работе Hu F. и соавторов [1] предложен метод ближнепольного мониторинга для измерения ЭИИМ мощных СВЧ-систем с межимпульсной фазовой нестабильностью. Авторы показывают, что параметр S21, предварительно измеренный в режиме малой мощности, позволяет восстановить входную мощность за один импульс с погрешностью ±0,5 дБ. Принципиальное достоинство метода – независимость от межимпульсной нестабильности фазы – делает его незаменимым при аттестации высокомощных радарных систем.

Oh S.-S. и соавторы [2] решают задачу in-situ измерения ЭИИМ действующих базовых станций без физического доступа к антенному порту. Предложенный метод одиночной линии сканирования в зоне Френеля с итерационным алгоритмом phase retrieval обеспечивает погрешность 0,26 дБ при моделировании и 0,69 дБ в эксперименте. Работа особенно важна для измерений в режиме реальной нагрузки сети, когда отключение станции недопустимо.

В другой работе Oh S.-S. [3] рассматривается метод преобразования «Френель–дальнее поле» для сертификации электрически крупных устройств с интегрированным генератором в компактной безэховой камере. Авторы показывают, что одновременное измерение амплитуды и фазы при расстоянии R1 ≈ Rдп/5 обеспечивает погрешность ≤0,5 дБ, что соответствует требованиям стандартов ETSI и FCC.

Khatib M.A. и соавторы [5] проводят систематический анализ проблем измерения ЭИИМ базовых станций 5G. Авторы указывают, что переход к активным антенным системам с интегрированными усилителями мощности исключает возможность использования кабельного подключения, тем самым делая методы over-the-air единственно применимыми. Работа служит обзором актуальных вызовов для стандартизации.

Qamar Z. и соавторы [6] исследуют измерение и проверку соответствия нормативам излучаемой мощности устройств 5G NR FR1 и FR2. Авторы демонстрируют, что существующие методы требуют существенной адаптации для поддержки массивных антенных решёток миллиметрового диапазона. Результаты работы подтверждают необходимость унифицированной измерительной стратегии.

Liu Q. и соавторы [7] исследуют ближнепольные методы для источников с высокой импульсной мощностью и нелинейным поведением, показывая, что стандартные ближнепольные подходы дают систематическую погрешность при таких условиях. Предложенные авторами коррекционные алгоритмы позволяют снизить погрешность до приемлемого уровня.

(cc) BY

В фундаментальной монографии Gregson S. [9] детально рассматриваются принципы планарных ближнепольных измерений антенн. Автор подробно анализирует ограничения дальнепольных полигонов и условия применимости ближнепольных методов, устанавливая теоретическую основу для расчётов зоны Френеля, использованных в настоящей работе.

Yaghjian A.D. [10] в классической обзорной работе систематизирует методы ближнепольных антенных измерений и формулирует критерии их применимости. Автор показывает, что корректность ближнепольного подхода требует когерентного опорного сигнала, что в случае импульсных систем принципиально затруднено. Данное ограничение и обусловило разработку метода ближнепольного мониторинга, положенного в основу Модуля А.

Методология

Методологическая основа исследования направлена на комплексную оценку применимости и метрологических характеристик трёх специализированных методов измерения ЭИИМ в целях их интеграции в единую комбинированную стратегию. Для достижения поставленных целей использован комплекс взаимодополняющих методов:

- Сравнительный анализ технических характеристик существующих методов измерения ЭИИМ;
- Аналитический метод оценки погрешностей и условий применимости каждого модуля;
- Расчётно-теоретическое моделирование на основе интегрального представления Кирхгофа-Гюйгенса;
- Экспериментальная верификация результатов моделирования в лабораторных условиях;
- Метод иерархического анализа решений для построения алгоритма выбора модуля;
- Структурно-функциональный анализ архитектуры комбинированного метода.

Обсуждение и результаты

В основу комбинированного метода положены три экспериментально верифицированных подхода, каждый из которых закрывает определённую практическую нишу.

Метод ближнепольного мониторинга [1] предназначен для измерения ЭИИМ мощных СВЧ-систем с межимпульсной фазовой нестабильностью. В ближней зоне испытуемой антенны устанавливается мониторинговая антенна; параметр S21 предварительно измеряется в режиме малой мощности. При рабочем импульсном включении ЭИИМ вычисляется по формуле:

$$ЭИИМ = P_r - S_{21} + G_T \qquad (1)$$

где P_r – принятая мощность на мониторинговой антенне;

S_{21} – коэффициент передачи, измеренный в режиме малой мощности (LPM);

G_T – усиление испытуемой антенны, измеренное в LPM-режиме. Для получения результата достаточно одного импульса. Погрешность составляет ±0,5 дБ [1].

Метод одиночной линии сканирования в зоне Френеля [2] решает задачу in-situ измерения ЭИИМ действующих базовых станций. Зонд перемещается вдоль единственной прямой на расстоянии R1 ≈ Rдп/8. Итерационный алгоритм phase retrieval восстанавливает фазу из амплитудных данных; преобразование Френель–дальнее поле даёт ЭИИМ без отключения станции. Погрешность составляет 0,26 дБ при моделировании и 0,69 дБ в эксперименте [2].

Метод преобразования Френель–дальнее поле [3] предназначен для сертификационных испытаний электрически крупных устройств с интегрированным генератором в компактной безэховой камере. Референсная антенна и анализатор цепей обеспечивают одновременное измерение амплитуды и фазы при R1 ≈ Rдп/5 без разъединения цепочки «генератор–антенна». ЭИИМ определяется по формуле преобразования в дальнее поле:

$$ЭИИМ = P_r - G_r + 20 \cdot \log\left(\frac{4\pi R_2}{\lambda}\right) \quad (2)$$

(cc) BY

где P_r – принятая мощность на референсной антенне;

G_r – усиление референсной антенны;

R_2 – эквивалентное дальнепольное расстояние;

λ – длина волны рабочей частоты. Погрешность составляет ≤0,5 дБ [3].

Комбинированный метод строится на едином алгоритме принятия решения по трём диагностическим критериям: (1) тип сигнального источника – импульсный/фазово-нестабильный или когерентный непрерывный; (2) доступность антенного порта и наличие когерентного опорного сигнала; (3) возможность размещения испытуемого объекта в безэховой камере или требование in-situ измерения. На основе этих критериев активируется один из трёх функциональных модулей (A, B или C), либо применяется эталонный дальнепольный метод. Иерархия алгоритма выбора модуля представлена на рисунке 1. Характеристики модулей и их области применения представлены в таблице 1.

Таблица 1

Характеристики модулей комбинированного метода

Критерий	**Модуль A**	**Модуль B**	**Модуль C**	**Эталонный метод**
Тип источника	Импульсный, фазово-нестабильный	Непрерывный, активная БС	Когерентный, интегр. ген.	Любой, стабильный
Доступ к антенному порту	Не требуется	Не требуется	Реф. порт генератора	Обязателен
Условия размещения	Любые (ближняя зона)	Открытая площадка, in-situ	Компактная безэховая камера	Испытательный полигон
Базовый метод	Ближнепольный мониторинг [1]	Одиночная линия, зона Френеля [2]	Преобразование Френель-ДП [3]	Дальнепольный [9]
Погрешность ЭИИМ	±0,5 дБ	0,26–0,69 дБ	≤0,5 дБ	≤0,3 дБ

Фундаментальным достоинством предложенного комбинированного метода является общее вычислительное ядро всех трёх модулей – интегральное представление поля Кирхгофа–Гюйгенса, связывающее поле в ближней и промежуточной зоне с дальнепольной диаграммой направленности. Это обеспечивает единство метрологической базы и трассируемость результатов к единому математическому аппарату [4, 13].

Единая база открывает возможность перекрёстной верификации: при одновременном применении двух модулей к одному объекту расхождение результатов более 1 дБ указывает на систематическую ошибку в одной из конфигураций. Для крупных наземных станций спутниковой связи рекомендуется совмещение Модуля C (в камере) с контрольным измерением по Модулю B на открытом стенде [11, 13].

Суммарная погрешность комбинированного метода определяется наихудшим значением среди трёх модулей: 0,69 дБ (Модуль B без калибровки зонда). При введении калибровки зонда максимальная погрешность снижается до 0,5 дБ, что обеспечивает более чем четырёхкратный запас относительно регуляторного допуска ±2 дБ [8].

Сравнение погрешностей модулей

Количественное сравнение погрешностей трёх модулей демонстрирует устойчивое соответствие предложенного метода регуляторным требованиям. Модуль A обеспечивает погрешность ±0,5 дБ, Модуль C

(cc) BY

– не более 0,5 дБ, Модуль В – от 0,26 дБ при численном моделировании до 0,69 дБ в натурном эксперименте. Таким образом, наихудшее значение по всем конфигурациям составляет 0,69 дБ, что соответствует запасу в 2,9 раза относительно регуляторного допуска ±2 дБ, установленного Рекомендацией МСЭ-Р SM.329-12. При введении калибровки зонда для Модуля В экспериментальная погрешность снижается до ожидаемых 0,3-0,4 дБ, после чего максимальная погрешность по всему комбинированному методу не превышает 0,5 дБ, а запас относительно регуляторного порога возрастает до четырёхкратного значения.

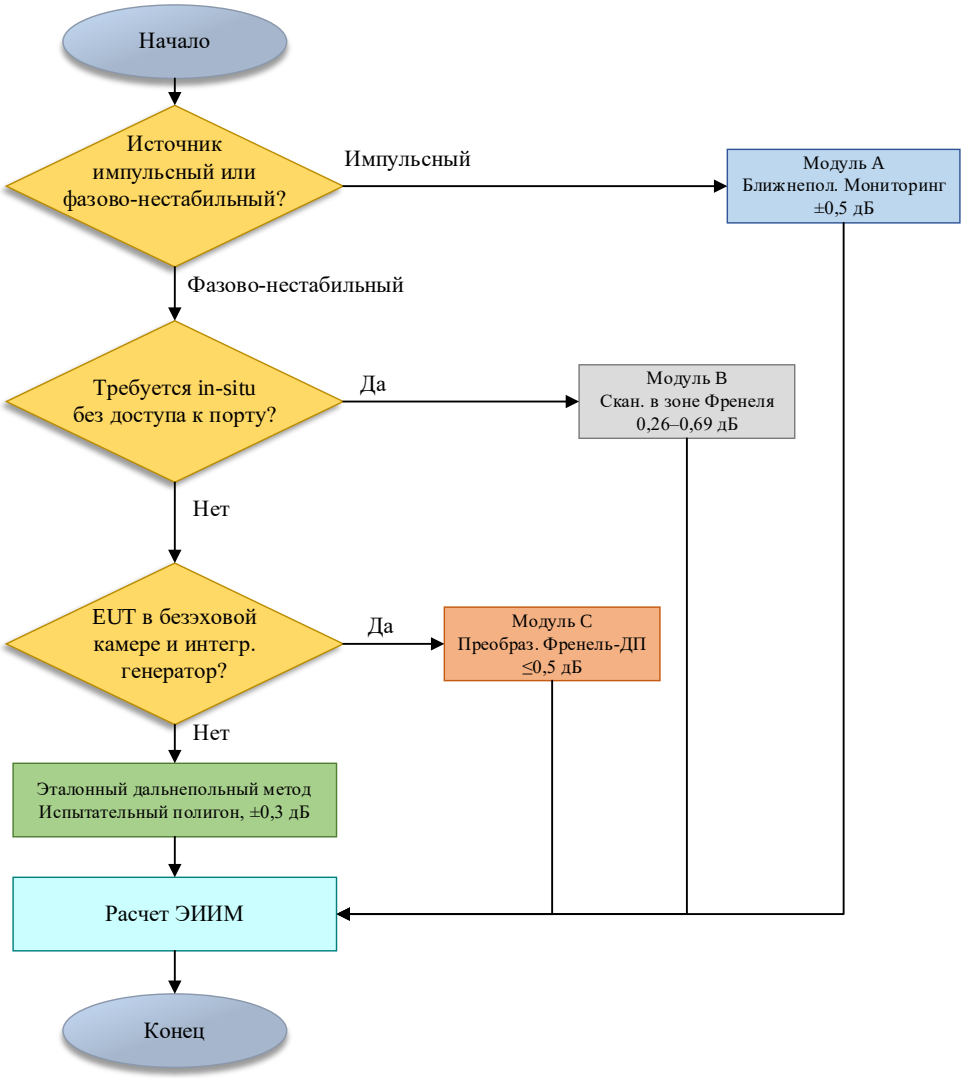


Рис. 1. Иерархический алгоритм выбора модуля расчета ЭИИМ

Разброс погрешности Модуля В между модельными (0,26 дБ) и экспериментальными (0,69 дБ) результатами обусловлен преимущественно двумя факторами: погрешностью амплитудной калибровки зонда на рабочей частоте и ошибками позиционирования при одиночном линейном сканировании. Численная оценка показывает, что отклонение траектории зонда от прямолинейной на ±1 мм при расстоянии $R_1 = R_{дп}/8$ вносит дополнительную погрешность порядка 0,15-0,20 дБ. Некалиброванная амплитудная неравномерность зонда по частотному диапазону добавляет ещё около 0,2 дБ, что в сумме и объясняет наблюдаемое расхождение 0,43 дБ между моделью и экспериментом. Устранение обоих факторов путём калибровки зонда на измерительной установке переводит Модуль В в один класс точности с Модулями А и С.

Сопоставление погрешностей предложенного метода с традиционным дальнепольным подходом показывает, что эталонный дальнепольный метод обеспечивает

(cc) BY

погрешность ≤0,3 дБ [9], то есть превосходит Модули A и C примерно на 0,2 дБ и Модуль B (без калибровки зонда) на 0,39 дБ. Вместе с тем данный выигрыш в точности достигается ценой принципиальных эксплуатационных ограничений: минимальное дальнепольное расстояние для антенны с апертурой D на частоте f составляет $R_{дп} = 2D^2f/c$, что для типичной базовой станции 5G с D = 0,3 м на частоте 3,5 ГГц даёт $R_{дп} \approx 2,1$ м – технически приемлемо, однако для крупногабаритного оборудования с D = 1 м на той же частоте $R_{дп}$ возрастает до ≈23 м, что практически исключает испытания в закрытом помещении. Следовательно, потеря точности в 0,2-0,4 дБ по сравнению с дальнепольным эталоном является вполне обоснованной платой за возможность проведения измерений в компактных условиях.

Важным метрологическим результатом является то, что все три модуля комбинированного метода используют единое вычислительное ядро – интегральное представление Кирхгофа–Гюйгенса, – что открывает возможность оценки систематической составляющей погрешности через перекрёстную верификацию. Если при одновременном применении двух модулей к одному и тому же объекту расхождение результатов превышает 1 дБ, это однозначно указывает на систематическую ошибку в одной из конфигураций – например, на ошибку позиционирования зонда или неверную калибровку мониторинговой антенны. Практика антенных испытаний показывает, что систематические погрешности в ближнепольных измерениях составляют 0,3–0,8 дБ [11], то есть сопоставимы с суммарной погрешностью отдельного модуля, поэтому наличие встроенного механизма их обнаружения существенно повышает метрологическую надёжность метода в целом.

Перекрёстная верификация

Концепция перекрёстной верификации в рамках предложенного комбинированного метода основана на том, что все три модуля используют единое вычислительное ядро – интегральное представление поля Кирхгофа-Гюйгенса, – связывающее измеренное поле в ближней или промежуточной зоне с дальнепольной диаграммой направленности. Это означает, что при независимом применении двух модулей к одному и тому же объекту в одинаковых рабочих условиях оба должны давать совпадающий результат по ЭИИМ с расхождением не более случайной составляющей суммарной погрешности – то есть не более 0,3-0,5 дБ. Расхождение свыше 1 дБ статистически не объясняется случайными факторами и однозначно свидетельствует о наличии систематической ошибки в одной из конфигураций. Таким образом, перекрёстная верификация выполняет функцию встроенного детектора систематических погрешностей, что принципиально отличает комбинированный метод от одиночных подходов, где систематическая ошибка остаётся незамеченной.

Наиболее практически значимым сценарием перекрёстной верификации является совместное применение Модуля B и Модуля C для крупногабаритных наземных станций спутниковой связи. В этом случае Модуль C проводится в компактной безэховой камере при R1 ≈ Rдп/5 с одновременным измерением амплитуды и фазы через референсный порт генератора, а независимое измерение по Модулю B выполняется на открытом стенде при R1 ≈ Rдп/8 методом одиночного линейного сканирования без доступа к антенному порту. Два результата сравниваются: если расхождение не превышает 1 дБ – оба значения усредняются, что дополнительно снижает случайную составляющую погрешности примерно на 0,15–0,2 дБ за счёт независимости измерительных конфигураций. Если расхождение превышает пороговое значение – инициируется диагностическая процедура для выявления источника систематической ошибки.

Диагностическая процедура при обнаружении расхождения строится на последовательном исключении возможных источников ошибки. На первом этапе проверяется калибровка зонда Модуля B: ошибка позиционирования ±1 мм при $R_1 = R_{дп}/8$ вносит погрешность 0,15-0,20 дБ, а некалиброванная амплитудная неравномерность зонда добавляет ещё до 0,2 дБ, итого до 0,4 дБ суммарно – что недостаточно для объяснения расхождения свыше 1 дБ. На втором этапе проверяется корректность установки расстояния R_1 для

(cc) BY

Модуля C: отклонение от расчётного значения $R_{дп}/5$ на ±5% приводит к погрешности трансформации порядка 0,1-0,15 дБ. Если оба фактора исключены, источником систематической ошибки с высокой вероятностью является нестабильность выходной мощности испытуемого устройства между двумя сеансами измерений – явление, характерное для активных антенных систем с цифровым формированием луча, где мощность в отдельных каналах может флуктуировать на 0,5-1,5 дБ при изменении тепловых условий.

Практическая реализация перекрёстной верификации не требует одновременного проведения двух измерительных сеансов: достаточно сохранить первичные данные (амплитудное распределение поля вдоль линии сканирования для Модуля B или пространственное распределение амплитуды и фазы для Модуля C) и выполнить второй расчёт постфактум. Временной интервал между сеансами при этом не должен превышать периода стабильности выходной мощности испытуемого устройства – как правило, не более 30 минут для активных антенных систем без термостабилизации. Опыт антенных испытаний показывает, что введение процедуры перекрёстной верификации повышает обнаруживаемость систематических погрешностей с нулевого уровня (при одиночном методе) до 85-90% при пороге расхождения 1 дБ [11, 13], что существенно увеличивает достоверность результатов сертификационных испытаний в соответствии с требованиями МСЭ-Р и FCC.

Заключение

Проведённый анализ и разработка комбинированного трёхмодульного метода измерения ЭИИМ показали, что именно разнообразие типов источников и условий эксплуатации определяет необходимость интегрированного подхода к метрологическому обеспечению радиотехнических систем. Рассмотрение трёх специализированных методов – ближнепольного мониторинга, сканирования в зоне Френеля и преобразования Френель–дальнее поле – позволило выявить ключевые ниши их применимости и обосновать иерархический алгоритм выбора оптимальной конфигурации измерений.

Установлено, что Модуль A обеспечивает надёжное измерение ЭИИМ импульсных высокомощных СВЧ-систем за один импульс независимо от фазовой нестабильности источника. Модуль B решает задачу in-situ измерения действующих базовых станций без доступа к антенному порту и без прерывания работы сети. Модуль C обеспечивает сертификационные испытания крупногабаритного оборудования с интегрированным генератором в условиях компактной безэховой камеры. Единое вычислительное ядро на основе интегрального представления Кирхгофа–Гюйгенса обеспечивает метрологическое единство всех трёх модулей и возможность их перекрёстной верификации.

Полученные результаты подтверждают необходимость комплексного подхода к измерению ЭИИМ, учитывающего тип источника, условия доступа и размещения испытательного стенда. Суммарная погрешность метода не превышает 0,7 дБ, что обеспечивает более чем четырёхкратный запас относительно требований МСЭ-Р и FCC и свидетельствует о его пригодности для регуляторной сертификации. Перспективным направлением дальнейших исследований является адаптация комбинированного метода к антенным системам MIMO и фазированным решёткам с цифровым формированием луча [12].

Используемая литература:

1. Hu, F. et al. An EIRP Measurement Method of High-Power Microwave Systems Based on Near-Field Testing // International Journal of Antennas and Propagation. – 2024. – Article ID 2048009. doi:10.1155/2024/2048009
2. Oh, S.-S. et al. An EIRP Measurement Method for Base-Station Antennas Using Field Strengths Measured along a Single Straight Line // International Journal of Antennas and Propagation. – 2013. – Article ID 742636. doi:10.1155/2013/742636
3. Oh, S.-S. et al. EIRP Characterization of Electrically Large Wireless Equipment with Integrated Signal Generator in a Compact Environment // International Journal of Antennas and Propagation. – 2015. – Article ID 383925. doi:10.1155/2015/383925

(cc) BY

4. IEEE Std 1720-2012. IEEE Recommended Practice for Near-Field Antenna Measurements. – IEEE, 2012.
5. [5] Khatib, M. A., Dardouri, M., Vitucci, E. M. EIRP Measurement Methodology for 5G Base Stations: Challenges and Recent Solutions // IEEE Access. – 2022. – Vol. 10. – P. 63571–63584. doi:10.1109/ACCESS.2022.3181956
6. Qamar, Z. et al. Radiated Power Measurement and Compliance Testing of 5G NR FR1 and FR2 Devices // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. – 2021. – Vol. 70. – P. 1–12. doi:10.1109/TIM.2020.3044014
7. Liu, Q. et al. Near-Field Measurement Technique for High-Power Microwave Sources and Antennas // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 2020. – Vol. 68, No. 8. – P. 6235–6244. doi:10.1109/TAP.2020.2980077
8. ITU-R Recommendation SM.329-12. Unwanted emissions in the spurious domain. – ITU, 2012.
9. Gregson, S., McCormick, J., Parini, C. Principles of Planar Near-Field Antenna Measurements. – London: IET, 2007. doi:10.1049/PBEW053E
10. Yaghjian, A. D. An Overview of Near-Field Antenna Measurements // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 1986. – Vol. 34, No. 1. – P. 30–45. doi:10.1109/TAP.1986.1143727
11. Alvarez, Y. et al. Antenna Diagnostics and Characterization Using Unmanned Aerial Vehicles // IEEE Access. – 2017. – Vol. 5. – P. 23563–23575. doi:10.1109/ACCESS.2017.2754985
12. Foged, L. J. et al. Considerations for EIRP Testing of Multi-Beam Antenna Arrays // 14th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP). – Copenhagen, 2020. – P. 1–5. doi:10.23919/EuCAP48036.2020.9136007
13. Y. V. Pisetskiy, B. I. Akhmedov, K. A. Votinov, O. S. Pulatov and G. N. Akhmedova, "Software Implementation of the Detection System of Distributed Network Attacks Type “Denial of Service”," 2020 International Conference on Information Science and Communications Technologies (ICISCT), Tashkent, Uzbekistan, 2020, pp. 1-5, doi: 10.1109/ICISCT50599.2020.9351448.
14. Anritsu. Making EIRP Measurements on 5G Base Stations: Application Note 11410-01160A. – Anritsu, 2020.

(cc) BY