

УДК 621.396.6:621.317.38

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ ИЗМЕРЕНИЯ ЭКВИВАЛЕНТНОЙ ИЗОТРОПНО-ИЗЛУЧАЕМОЙ МОЩНОСТИ В РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

Ю.В. ПИСЕЦКИЙ¹, К.А. ВОТИНОВ¹, Д.Д. ДАДАМУХАМЕДОВА¹

¹Ташкентский университет информационных технологий имени Мухаммада ал-Хоразми
(Ташкент, Узбекистан)

E-mail: vuriv.pisetskiy@mail.ru

Аннотация. Эквивалентная изотропно-излучаемая мощность является фундаментальным параметром при проектировании, сертификации и регуляторном контроле беспроводных и спутниковых систем. Несмотря на то, что классический дальнепольный метод остаётся эталонным, его практическое применение существенно ограничено требованиями к размеру испытательного полигона и чувствительностью к многолучевым искажениям. В настоящем исследовании представлен систематический сравнительный анализ пяти методов измерения Эквивалентная изотропно-излучаемая мощность: классического дальнепольного, традиционного ближнепольного сканирования, ближнепольного мониторинга для мощных СВЧ-систем, метода одиночной линии сканирования в зоне Френеля для контрольных измерений базовых станций и метода преобразования «Френель-дальнее поле» для электрически крупных устройств с интегрированным генератором. Каждый метод оценивается по пяти критериям: применимость к импульсным/фазово-нестабильным источникам, возможность измерений на объекте эксплуатации, требования к размеру стенда, необходимость разведения антенны и генератора, достижимая погрешность. Анализ показал, что ни один из методов не является универсальным, а три современных подхода закрывают принципиально различные практические ниши, обеспечивая необходимую погрешность 0,26-0,69 дБ.

Abstract. Equivalent Isotropically Radiated Power is a fundamental parameter in the design, certification, and regulatory compliance of wireless and satellite systems. While the classical far-field method remains the reference standard, its practical application is severely constrained by test-site size requirements and susceptibility to multipath distortion. This paper presents a systematic comparative analysis of five Equivalent Isotropically Radiated Power measurement methods: the classical far-field method, the conventional near-field scanning method, the near-field monitoring method for high-power microwave systems, the Fresnel-region single-line scanning method for in-situ base-station measurements, and the Fresnel-to-far-field transformation method for electrically large equipment with integrated signal generators. Each method is evaluated against five criteria: applicability to pulsed/phase-unstable sources, feasibility of in-situ deployment, test-site size requirements, necessity of antenna-generator disconnection, and achievable measurement uncertainty. The analysis reveals that no single method is universally applicable, and that the three contemporary methods each address a distinct practical constraint unmet by classical approaches, with measurement uncertainties of 0.26-0.69 dB.

Введение

Эквивалентная изотропно-излучаемая мощность (ЭИИМ) – интегральный параметр, объединяющий мощность передатчика, коэффициент усиления антенны и потери в фидерном тракте:

$$ЭИИМ(\text{дБм}) = P_m + GT - LT \quad (1)$$

где P_m – мощность передатчика; GT – усиление антенны; LT – потери в линии передачи. Данный параметр служит единой сравнительной мерой для излучающих систем любого класса: от абонентских терминалов до транспондеров геостационарных спутников.

Точное знание ЭИИМ критически важно в нескольких прикладных областях. В спутниковой связи ЭИИМ наземного сегмента непосредственно определяет энергетический бюджет канала и достижимое отношение сигнал/шум на бортовом приёмнике [4]. В сетях сотовой связи пятого поколения (5G) появление активных антенных систем с формированием луча сделало ЭИИМ основной метрикой мощности передатчика [5, 6]. В системах высокоомощной СВЧ-техники, например в радарх, медицинских терапевтических установках или оборонных применениях, оценка ЭИИМ необходима для верификации технических характеристик [7]. Регуляторные органы, такие как Международный союз электросвязи (МСЭ) и национальные агентства типа FCC (Federal Communications Commission - Федеральная комиссия по связи США) устанавливают предельные значения ЭИИМ для предотвращения межсистемных помех [8].

Несмотря на кажущуюся простоту формулы, точное измерение ЭИИМ сопряжено с принципиальными трудностями, обусловленными разнообразием типов источников и условий эксплуатации. Классический дальнепольный метод требует расстояния $R \geq 2D^2/\lambda$ между антенной под испытанием (AUT – antenna under test) и приёмной антенной, что для современных крупных антенн и миллиметровых диапазонов составляет десятки и сотни метров [9]. Традиционный ближнепольный метод сокращает дистанцию, однако требует фазовой стабильности источника и длительного сканирования, что недостижимо для импульсных систем и невозможно при измерениях на действующих объектах [10].

В последние годы предложен ряд альтернативных подходов, направленных на преодоление этих ограничений. Однако их систематическое сравнение по единым критериям в литературе представлено недостаточно. Настоящая работа восполняет данный пробел: проведён критический анализ пяти методов измерения ЭИИМ с оценкой по пяти ключевым практическим критериям.

Анализируемые методы измерения ЭИИМ

1. Классический дальнепольный метод

Дальнепольный метод является эталонным: приёмная антенна с известным коэффициентом усиления G_r устанавливается на расстоянии, удовлетворяющем критерию Рэлея. Принятая мощность P_r измеряется анализатором спектра или измерителем мощности, ЭИИМ рассчитывается через уравнение передачи Фрица:

$$\text{ЭИИМ}(\text{дБм}) = P_r - G_r + \text{FSPL}, \quad (2)$$

где $\text{FSPL} = 20 \cdot \log(4\pi R/\lambda)$ – потери в свободном пространстве. Для антенн с апертурой $D = 0,5$ м на частоте 10 ГГц минимальная дистанция составляет около 17 м, для 1-метровой апертуры при той же частоте – уже 67 м. В условиях городской застройки многолучевое распространение приводит к значительным систематическим ошибкам [9, 10].

2. Традиционный ближнепольный метод

При традиционном ближнепольном подходе зонд последовательно перемещается по сканирующей поверхности (плоской, цилиндрической или сферической) вблизи AUT. После получения полного распределения амплитуды и фазы ближнего поля выполняется численное преобразование в дальнее поле, из которого извлекается ЭИИМ [4, 10]. Метод позволяет работать в компактных безэховых камерах и обеспечивает диагностику диаграммы направленности антенны. Однако он непригоден для двух важных классов задач: во-первых, для высокомоощных СВЧ (ВМ СВЧ) систем с межимпульсной фазовой нестабильностью; во-вторых, для действующих базовых станций, у которых недоступен опорный сигнал, а зонд вблизи антенны создаёт помехи в эфирном интерфейсе.

3. Метод ближнепольного мониторинга для ВМ СВЧ-систем [1]

В работе [1] предложен принципиально иной подход для измерения ЭИИМ мощных СВЧ-систем. В ближней зоне AUT устанавливается крупногабаритная мониторинговая антенна. Параметр S_{21} между мониторинговой и испытуемой антенной измеряется в режиме малой мощности (LPM – low power mode), при котором фаза стабильна. При импульсном включении системы фиксируется мощность P_r , а входная мощность передатчика восстанавливается по формуле $P_{\text{вх}} = P_r - S_{21}$. Метод требует лишь одного импульса, что принципиально устраняет проблему межимпульсной нестабильности фазы. Достигнутая погрешность – $\pm 0,5$ дБ [1].

Ограничения: необходимость предварительной калибровки S_{21} в LPM-режиме при строго неизменном взаимном расположении антенн; ограниченная применимость к системам без режима малой мощности.

4. Метод одиночной линии сканирования в зоне Френеля [2]

Метод [2] предназначен для измерения ЭИИМ антенн базовых станций в условиях эксплуатации (in-situ). Зонд перемещается линейно на расстоянии $R_1 \approx R_{\text{дл}}/8$ от антенны – лишь вдоль одной прямой. Фаза восстанавливается из амплитудных данных итерационным алгоритмом «Phase Retrieval» с параметрическим представлением фазового фронта. Преобразование «Френель-дальнее поле» даёт ЭИИМ без отключения базовой станции и без физического доступа к антенному порту. Точность: 0,26 дБ (моделирование), 0,69 дБ (эксперимент) [2].

Ограничения: итерационный алгоритм требует корректного начального приближения; точность снижается для антенн с нестандартными фазовыми распределениями.

5. Метод Френель-дальнее поле для крупногабаритного оборудования с интегрированным генератором [3]

Метод [3] нацелен на сертификационное измерение ЭИИМ электрически крупных устройств с интегрированным генератором в компактной безэховой камере. Разъединение генератора и антенны по условиям сертификации недопустимо. Авторы предложили модифицированный метод измерения фазы: референсная

антенна и анализатор цепей обеспечивают одновременное получение амплитуды и фазы при $R_1 \approx R_{дл}/5$, после чего выполняется преобразование в дальнее поле по алгоритму Френеля. Погрешность относительно эталонного дальнепольного измерения – 0,5 дБ [3].

Ограничения: предполагает когерентный источник с доступным референсным портом; при отсутствии такого порта требуется модификация схемы.

Сравнительный анализ методов

Для систематического сопоставления методов сформулированы пять критериев сравнения: (1) применимость к импульсным или фазово-нестабильным источникам; (2) возможность измерения на объекте эксплуатации (in-situ); (3) требования к габаритам испытательного стенда; (4) необходимость разъединения АУТ и генератора; (5) достижимая погрешность измерения ЭИИМ. Результаты систематизированы в таблице 1.

Таблица 1. Сравнение методов измерения ЭИИМ

Метод	Импульсный источник	In-situ	Стенд	Разъед. ген.	Погрешность
Дальнепольный	–	–	Большой ($\geq R_{рзля}$)	Да	< 0,3 дБ
Традиционный ближнепольный	–	Частично	Средний	Да	< 0,5 дБ
Ближнепольный мониторинг [1]	+ (1 импульс)	Ограниченно	Малый	Нет	$\pm 0,5$ дБ
Одиочная линия, зона Френеля [2]	–	+	Малый	Нет	0,26-0,69 дБ
Френель–дальнее поле, интегральное генерирование [3]	–	–	Малый ($\approx R_{дл}/5$)	Нет	$\leq 0,5$ дБ

Анализ таблицы выявляет ряд принципиальных закономерностей. Во-первых, классический дальнепольный метод и традиционный ближнепольный метод не могут применяться ни к импульсным источникам, ни к активным базовым станциям. То есть, именно к тем классам оборудования, которые наиболее распространены в современных сетях 5G и системах ВМ СВЧ [5, 11]. Во-вторых, все три современных метода [1–3] обеспечивают компактный стенд и не требуют разъединения генератора с антенной, что кардинально расширяет возможности сертификационных испытаний. В-третьих, погрешности современных методов (0,26-0,69 дБ) сопоставимы с погрешностями классических подходов и существенно укладываются в допуск ± 2 дБ, установленный регуляторными органами для сертификации базовых станций [8].

Вместе с тем каждый из трёх современных методов закрывает строго определённую практическую нишу: метод [1] – импульсные ВМ СВЧ-системы, метод [2] – действующие базовые станции на объекте эксплуатации, метод [3] – компактное сертификационное испытание устройств с интегрированным генератором. Ни один из них не является универсальным: применение метода [1] к базовым станциям невозможно из-за отсутствия LPM-режима, метода [2] к ВМ СВЧ – из-за предположения о когерентности источника, метода [3] к in-situ задачам – из-за потребности в безэховой камере. Это означает, что для покрытия полного спектра практических условий необходима интеграция методов в единую измерительную стратегию [12].

Отдельного внимания заслуживает вопрос метрологической трассируемости. Все три современных метода используют в качестве вычислительного ядра преобразование из ближней или промежуточной зоны в дальнее поле – аппарат интегрального представления Кирхгофа-Гюйгенса. Это обеспечивает концептуальное единство методов и открывает возможность их перекрёстной верификации при параллельном применении двух модулей к одному объекту [13].

Заключение

Проведён систематический сравнительный анализ пяти методов измерения ЭИИМ в радиотехнических системах. Установлено, что классические методы (дальнепольный и традиционный ближнепольный) обеспечивают высокую точность только в контролируемых лабораторных условиях и принципиально неприменимы к импульсным источникам и in-situ измерениям. Три современных метода [1–3] преодолевают эти ограничения, каждый в своей практической нише, при достигаемой погрешности 0,26-0,69 дБ, что с запасом удовлетворяет регуляторным требованиям МСЭ-Р и FCC.

Ключевой вывод анализа состоит в том, что ни один из методов не является универсальным: области их оптимальной применимости строго разграничены по трём критериям: типу источника, доступности антенного порта и условиям размещения стенда. Данное обстоятельство обуславливает необходимость разработки комбинированной стратегии измерений, объединяющей преимущества рассмотренных подходов. Синтез такой стратегии и её метрологическое обоснование являются предметом отдельного исследования авторов.

Список использованных источников

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
4. IEEE Std 1720-2012. IEEE Recommended Practice for Near-Field Antenna Measurements. – IEEE, 2012.
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. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.itu.int/rec/R-REC-SM.329/en>
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. Anritsu. Making EIRP Measurements on 5G Base Stations: Application Note 11410-01160A. – Anritsu, 2020. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://dl.cdn-anritsu.com/en-us/test-measurement/files/Application-Notes/Application-Note/11410-01160A.pdf>