

СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЯ РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК АНТЕНН

П.В. Миляев, Ю.Н. Калинин, Д.И. Савченко

НПП «ТРИМ» СШП Измерительные системы», Санкт-Петербург

*pavel@trimcom.ru,
kalinin@trimcom.ru,
d_savch@trimcom.ru*

Рассматриваются современные методы и средства измерения характеристик антенн в дальней и ближней зонах излучения. Отмечаются особенности и области применения различных методов. Приводятся примеры измерительных комплексов, реализующих данные методы. Рассматриваются оригинальные, а также недостаточно освещённые в литературе алгоритмы обработки данных при измерении отдельных характеристик антенн. Описана структура и функционал новейшего программного обеспечения. Все методы измерений, алгоритмы и программы обработки разработаны и реализованы на протяжении последних 20 лет в антенных измерительных комплексах производства НПП «ТРИМ», успешно функционирующих на многочисленных отечественных и зарубежных предприятиях.

Ключевые слова: методы и средства измерения, антенны, ближняя зона излучения, алгоритмы обработки, векторные анализаторы цепей.

MODERN METHODS AND MEASURING INSTRUMENTS OF RADIO ENGINEERING ANTENNA CHARACTERISTICS

P.V. Miliayev, Yu.N. Kalinin, D.I. Savchenko

NPP "TRIM" UWB Measuring Systems", St. Petersburg

*pavel@trimcom.ru,
kalinin@trimcom.ru,
d_savch@trimcom.ru*

Modern methods and instruments of measuring the characteristics of antennas in the far and near radiation zones are considered. The features and areas of application of various methods are noted. Examples of measuring complexes implementing these methods are given. The original, as well as insufficiently presented in the literature data processing algorithms for measuring the separate characteristics of the antennas. The structure and functionality of the latest software is described. All measurement methods, algorithms and processing programs have been developed and implemented over the past 20 years in antenna measurement systems produced by NPP "TRIM", successfully operating at numerous domestic and foreign enterprises.

Key words: methods and measuring instruments, antennas, near-zone radiation, processing algorithms, vector network analyzers.

Введение

Требования к характеристикам и параметрам современных антенных систем постоянно растут. Развитие антенной техники в этих условиях невозможно без соответствующего (а желательно — опережающего) развития методов и средств антенных измерений.

За рубежом качественный скачок в теории и технике антенных измерений произошёл на рубеже 80–90-х гг. В первую очередь это касается развития методов и средств измерения антенн в ближней зоне излучения. Именно к этому периоду относится появление многочисленных публикаций, в которых фундаментальная теория измерений антенн в ближнем поле получила своё развитие в прикладном аспекте.

Этот скачок был обусловлен, главным образом, интенсивным развитием средств вычислительной техники. Рост производительности и объёмов памяти вычислительных средств позволил решить основную в то время проблему измерений в ближнем поле — необходимость обработки больших объёмов измерительной информации в приемлемые временные сроки. В антенных измерительных комплексах ближнего и дальнего поля обычный персональный компьютер взял на себя все основные функции управления аппаратурой комплекса, сбора и обработки данных, отображения и каталогизации результатов.

Начиная с середины 80-х гг. появляется и в 90-х гг. переживает настоящий бум своего развития новый класс измерительных приборов — высокоточные векторные анализаторы цепей. Появление этих приборов стало не менее важным фактором, определившим качественный сдвиг в деле антенных измерений.

Научно-производственное предприятие «ТРИМ» с 1997 г. на уровне ведущих мировых компаний занимается комплексным освоением и развитием современных методов и средств измерения антенн, разработкой и производством автоматизированных антенных измерительно-вычислительных комплексов (АИВК) и является ведущим российским предприятием в этой области. За эти годы предприятием разработано, изготовлено и поставлено заказчикам порядка девяноста АИВК, реализующих практически все известные на сегодняшний день методы измерения антенн. Некоторые из этих комплексов уникальны и не имеют аналогов в мире.

Классификация измерительных комплексов

Особенностью антенных систем как объектов измерения является их чрезвычайное многообразие по массогабаритным показателям, конструктивным особенностям, характеристикам направленности, частотному диапазону и, наконец, доступным для измерения условиям.

Исходя из комплексного анализа перечисленных факторов, на начальном этапе разработки АИВК выбирается метод измерения, подходящий для измерения данной антенны (или набора антенн) в заданных условиях, определяются состав и структура измерительного комплекса.

Классификация методов измерения антенн и связанных с ними типов АИВК показана на рис.1.

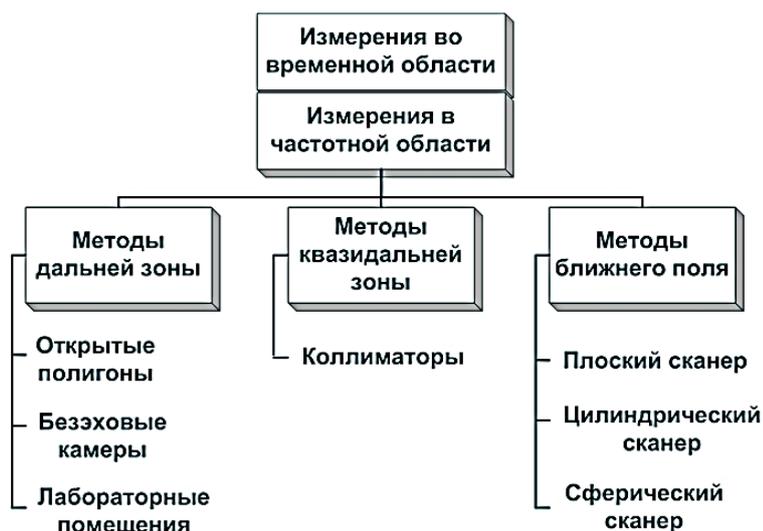


Рис. 1. Классификация методов измерения антенн и типов АИВК

По типу используемого зондирующего сигнала все АИВК подразделяются на комплексы для измерения в частотной области и комплексы для измерения во временной области.

Измерения в *частотной* области — это измерения с помощью обычных монохроматических сигналов. Основу измерительного комплекса в данном случае составляет векторный анализатор цепей (ВАЦ), как правило, производства компаний Keysight или Rohde&Schwarz.

Измерения во *временной* области — это измерения с помощью сверхширокополосных (СШП) импульсных сигналов малой длительности (порядка десятков–единиц пикосекунд), имеющих абсолютную ширину спектра частот Δf порядка десятков гигагерц и относительную широкополосность $\Delta f/f_0 \rightarrow 2$ (f_0 — средняя частота). Основу радиотехнической аппаратуры АИВК в этом случае составляют генератор сверхкоротких импульсов и стробоскопический приёмник — собственные разработки НПП «ТРИМ».

Основным достоинством измерений во временной области является возможность временной селекции мешающих отражений. Длительность временного окна, в котором выполняются измерения, определяется широкополосностью исследуемой антенны. При измерении достаточно широкополос-

ных антенн требуемая длительность временного окна может оказаться меньше времени запаздывания переотражённых помеховых сигналов для данного конкретного измерительного полигона. Это позволяет отказаться от использования дорогостоящих безэховых камер и радиопоглощающих покрытий и устанавливать комплекс в обычных лабораторных помещениях.

Заметим, что измерения во временном окне конечных размеров можно также реализовать путём синтеза СШП многочастотного измерительного сигнала с помощью ВАЦ.

По характеру используемой для измерения области излучения антенны все методы измерения подразделяются на методы дальней, квазидальней и ближней зоны.

При измерениях в *дальней* зоне [1] АИВК может располагаться на открытом полигоне, в безэховой камере и, в упомянутых выше случаях, в обычном лабораторном помещении. При этом расстояние между исследуемой и вспомогательной антеннами должно составлять не менее $2D^2/\lambda$ (D — максимальный размер антенны, λ — длина волны).

Структурная схема современного измерительного комплекса дальней зоны показана на рис. 2. Расстояние между вспомогательной и исследуемой антеннами составляет 2,5 км. Комплекс предназначен для измерения характеристик остронаправленных наземных зеркальных антенн систем спутниковой связи.

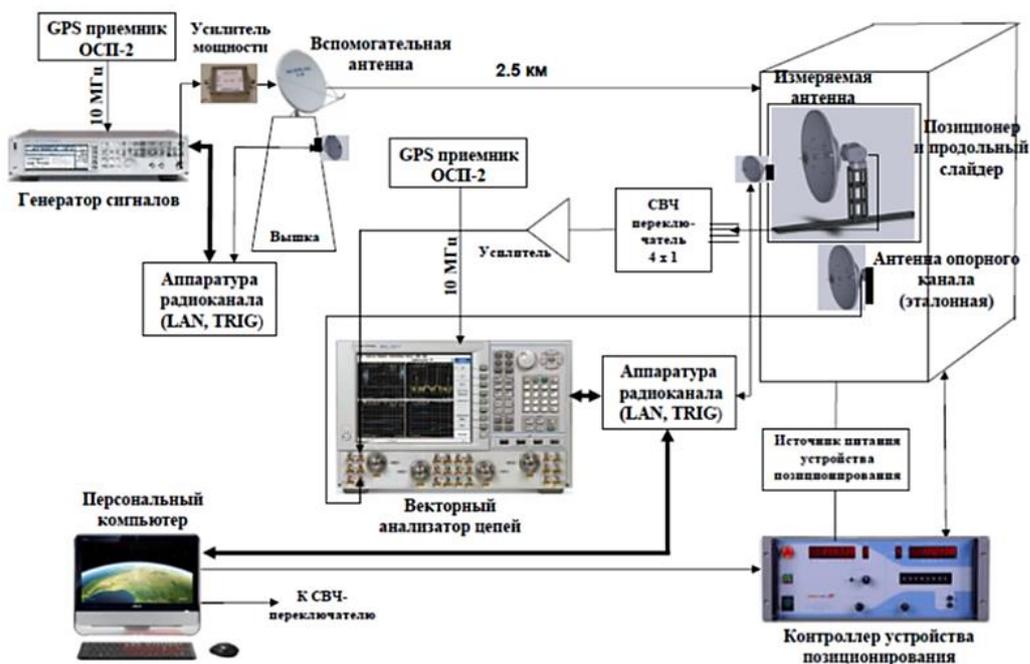


Рис. 2. Структурная схема АИВК дальней зоны с протяжённостью полигона 2,5 км

Особенностями АИВК, обусловленными большой длиной полигона, являются:

- синхронизация частот генератора тестовых сигналов и векторного анализатора цепей по каналу GPS;
- наличие отдельного радиоканала для передачи сигналов синхронизации, управления и голосовой связи между передающей и приёмной частями комплекса;
- использование на выходе генератора тестовых сигналов твердотельного усилителя мощности в диапазоне 30...50 ГГц.

Сигнал для опорного приёмника векторного анализатора принимается дополнительной антенной опорного канала, в качестве которой используется эталонная антенна. Измеренная диаграмма направленности автоматически нормируется в единицах коэффициента усиления.

Для повышения точности измерений путём усреднения мешающих отражений трёхкоординатное опорно-поворотное устройство (азимут – угол места – крен) установлено на продольном слайдере. За счёт использования быстродействующего СВЧ-переключателя возможно одновременное измерение четырёх каналов исследуемой антенны. При необходимости для повышения отношения сигнал/шум используется малошумящий усилитель.

Основные характеристики комплекса:

- диапазон частот 1...50 ГГц;
- максимальная нагрузка на ОПУ 2000 кг·м;
- число координат ОПУ 3 (азимут, угол места, крен);
- точность позиционирования $\pm 0,005^\circ$;
- интервал перемещения ОПУ на слайдере 0,6 м (продольное);
- мощность излучения 20...30 дБм;
- инструментальные погрешности измерения:
 - амплитудная ДН ± 1 дБ на уровне -40 дБ;
 - коэффициент усиления $\pm 0,3$ дБ;
 - коэффициент эллиптичности $\pm 0,3$ дБ.

Измерения в квазидальной зоне выполняются с помощью коллиматора. Коллиматоры размещаются в безэховых камерах (БЭК). БЭК с коллиматором и другим оборудованием для измерения характеристик антенн часто называют компактным полигоном [2].

Однозеркальный коллиматор представляет собой вырезку параболического рефлектора большого размера. При облучении из фокуса коллиматор формирует вблизи своего раскрытия участок плоского волнового фронта — рабочую зону, в которую помещается исследуемая антенна. Размеры рабочей зоны составляют, как правило, до 70% от геометрических размеров коллиматора.

Схемы построения двухзеркальных коллиматоров могут быть различными. Наиболее распространена схема с вспомогательным рефлектором в виде симметричной боковой вырезки из гиперboloида и основным рефлектором в виде такой же вырезки из параболоида. Основным преимуществом такого коллиматора является существенно более низкий уровень кроссовой составляющей.

Общий вид АИВК на основе двухзеркального коллиматора показан на рис. 3. Данный комплекс предназначен для измерения характеристик антенн и параметров полезной нагрузки спутников-ретрансляторов (эффективной изотропно-излучаемой мощности, плотности потока насыщения, шумовой добротности G/T и др.). Антенны могут измеряться автономно, в составе модулей полезной нагрузки, а также непосредственно в составе космического аппарата. При измерении характеристик полезной нагрузки при необходимости можно формировать две рабочие зоны диаметром 5 метров, смещённые относительно оси полигона. Смещённые рабочие зоны используются в случае, если приёмная и передающая антенны спутника разнесены на большое расстояние и не помещаются в основную рабочую зону полигона диаметром 8 метров.



Рис. 3. АИВК на основе двухзеркального коллиматора с размером основного зеркала 10×12 м и рабочей зоной диаметром 8 м

Основные характеристики системы формирования плоской волны:

– размеры основного рефлектора	11.9 м × 10.0 м;
– размеры вспомогательного рефлектора	8.85 м × 8.6 м;
– масса основного рефлектора	~140 000 кг;
– масса вспомогательного рефлектора	~100 000 кг;

– точность изготовления поверхности (СКО)	~10 мкм;
– диапазон частот	1...46 ГГц;
– неравномерность амплитуды:	
– квадратичная составляющая	<1 дБ;
– флуктуации	±0.5 дБ;
– неравномерность фазы:	
– квадратичная составляющая	<5°;
– флуктуации	±6–10°.
Погрешности измерения характеристик антенн:	
– коэффициент усиления	±0.25 дБ;
– уровень боковых лепестков	±0.75 дБ;
– положение оси диаграммы направленности	±0.02°.

Измерения в *ближней* зоне [4, 5] выполняются на расстоянии порядка $3...5\lambda$ (λ — длина волны) от излучающей поверхности антенны. При этом небольшая слабонаправленная антенна-зонд перемещается вблизи исследуемой антенны по заданной поверхности сканирования. В зависимости от структуры ближнего поля и, соответственно, характера диаграммы направленности используются комплексы планарного (плоского), цилиндрического и сферического сканирования.

Наиболее распространённые и востребованные комплексы *планарного* сканирования [2, 4, 6] используются для измерения характеристик направленных антенн с коэффициентом усиления порядка 15 дБ и выше (рупорные, зеркальные антенны, фазированные антенные решётки). Для этих типов антенн можно считать, что практически всё излучаемое ими поле сосредоточено на некоторой плоскости вблизи раскрыва антенны.

При измерениях в плоском сканере исследуемая антенна устанавливается стационарно, а небольшая вспомогательная слабонаправленная антенна-зонд механически перемещается вдоль плоской поверхности вблизи раскрыва по координатам X и Y , производя измерения поля в узлах заданной равномерной прямоугольной сетки с шагом $\Delta x = \Delta y \leq \lambda/2$. По измеренному амплитудно-фазовому распределению (АФР) рассчитывается диаграмма направленности и другие характеристики антенны.

По расположению плоскости сканирования планарные сканеры могут быть вертикальными, горизонтальными и наклонными.

Пример горизонтального сканера с размером области сканирования 10×16 м показан на рис. 4. Высота сканера составляет 15 м. Сканер предназначен для измерения спутниковых антенн автономно и в составе космического аппарата в рабочем положении. Зондовая антенна сканера расположена на позиционере «азимут – элевация – азимут». Благодаря этому данный АИВК способен осуществлять также цилиндрическое и сферическое сканирования в ограниченных секторах углов.

Одной из уникальных конструкций измерительных комплексов, реализованных НПП «ТРИМ», является АИВК на основе наклонного сканера с размером области сканирования 32×13 м и возможностью наклона вертикальной оси от 0° до 32°.



Рис. 4. АИВК на основе горизонтального сканера

Наименее востребованные комплексы *цилиндрического* сканирования используются для измерения антенн с диаграммами направленности веерного типа — широкими в одной плоскости и узкими в другой.

Комплексы *сферического* сканирования [3] применяются преимущественно для измерения характеристик слабонаправленных антенн (спиральные, логопериодические, открытые концы волноводов, облучатели зеркальных антенн и т.п.). Однако данный метод измерения является универсальным и может использоваться для измерения всех типов антенн. В частности, одним из применений этого метода является измерение характеристик ФАР с обтекателями.

Современные методы измерения и алгоритмы обработки

Рассмотрим алгоритмы обработки данных при измерении одного из наиболее важных параметров антенн — коэффициента усиления (КУ). Широко известными и наиболее распространёнными методами измерения КУ являются метод эталонной антенны и метод трёх антенн в дальней зоне. В данном разделе рассмотрим менее распространённые методы и алгоритмы — оригинальные и недостаточно освещённые в литературе.

Измерение КУ прямым методом в плоском сканере. Непосредственный расчёт КУ по результатам измерения АФР на плоскости сканирования может быть выполнен при известном КУ зондовой антенны и известном коэффициенте передачи кабелей, по которым распространяется измерительный сигнал [7]. В этом случае КУ исследуемой антенны (ИА) рассчитывается по формуле (1):

$$G_a(\vec{K}_0) = \left(\frac{4\pi}{\lambda^2}\right)^2 \frac{\left|\Delta^2 \sum_j S(\vec{P}_j) e^{-i\vec{K}_0 \cdot \vec{P}_j}\right|^2}{G_p(\vec{K}_0)L^2}, \quad (1)$$

где Δ — шаг сканирования; $G_p(\vec{K}_0), G_a(\vec{K}_0)$ — КУ зонда и ИА соответственно, в направлении максимума диаграммы направленности, заданного вектором \vec{K}_0 ; $S(\vec{P}_j)$ — комплексный коэффициент передачи, измеренный на плоскости в j -й точке, заданной вектором \vec{P}_j ; L — затухание в приёмо-передающем тракте, измеренное при прямом соединении входа зонда и выхода ИА.

Если дополнить измерение АФР измерением абсолютной мощности в одной точке плоскости сканирования (при работе ИА на передачу), то можно рассчитать эквивалентную изотропно-излучаемую мощность (ЭИИМ), или потенциал П:

$$\Pi(\vec{K}_0) = \left(\frac{4\pi}{\lambda^2}\right)^2 \frac{\left|\Delta^2 \sum_j S'(\vec{P}_j) e^{-i\vec{K}_0 \cdot \vec{P}_j}\right|^2}{G_p(\vec{K}_0)} \Sigma_0(\vec{P}_0), \quad (2)$$

где $S'(\vec{P}_j)$ — комплексный коэффициент передачи из выражения (1), нормированный к точке \vec{P}_0 ; $\Sigma_0(\vec{P}_0)$ — абсолютный уровень мощности, измеренный в точке \vec{P}_0 .

Измерение КУ прямым методом в дальней зоне и в коллиматоре. Если вспомогательная антенна или облучатель коллиматора откалиброваны по КУ, то КУ ИА можно рассчитать непосредственно на основе формулы Фрисса:

$$G_a = \left(\frac{4\pi R}{\lambda}\right)^2 \frac{|S|^2}{G_{et}L^2}, \quad (3)$$

где S — измеренный коэффициент передачи; G_{et} — КУ вспомогательной антенны или облучателя коллиматора; L — затухание в приёмо-передающем тракте, измеренное при прямом соединении входа вспомогательной антенны или облучателя коллиматора с выходом ИА; R — расстояние между вспомогательной антенной и ИА или эквивалентное расстояние дальней зоны, соответствующее сферическому распространению волны, в коллиматорах.

При измерении ослабления в тракте L , как правило, используется дополнительный откалиброванный кабель.

Измерение КУ в плоском сканере комбинированным методом. Этот метод применяется в тех случаях, когда используемая в АИВК эталонная антенна по своим направленным свойствам не подходит для измерения в плоском сканере. Как правило, это имеет место на частотах примерно от 1 ГГц и ниже. Комбинированный метод сочетает сканирование ИА в ближней зоне и измерение эталонной антенны в дальней зоне. В качестве вспомогательной антенны при этом используется зонд сканера. КУ рассчитывается в соответствии с выражением:

$$G_a(\vec{K}_0) = \frac{\left| \Delta^2 \sum_j S(\vec{P}_j) e^{-i\vec{K}_0 \cdot \vec{P}_j} \right|^2}{(S_{et})^2 L^2} \frac{G_{et}(\vec{K}_0)}{(\lambda d)^2}, \quad (4)$$

где S_{et} — коэффициент передачи, измеренный на выходе эталонной антенны в дальней зоне; G_{et} — КУ эталонной антенны; d — расстояние между зондом и эталонной антенной при измерении в дальней зоне.

Измерение КУ и ЭИИМ прямым методом в сферическом сканере [10]. Способы прямого измерения КУ и ЭИИМ в сферических сканерах недостаточно освещены в доступных источниках. Теоретические основы рассматриваются в [3]. В [8] приводится пример измерения ЭИИМ, выполненного с помощью закрытого программного обеспечения компании TICRA. В [9] основное внимание уделено учёту влияния приёмо-передающего тракта, при этом практические результаты измерения КУ не приводятся.

Расчёт поля антенны в дальней зоне по измерениям ближнего поля на сфере. При измерении характеристик антенн в сферическом сканере используется аппроксимация поля $\vec{E}(\theta, \phi)$, создаваемого антенной в дальней зоне в направлении (θ, ϕ) сферической системы координат, сферическими волновыми функциями $\vec{K}_{smn}(\theta, \phi)$:

$$\vec{E}(\theta, \phi) = \sum_{s=1}^2 \sum_{n=1}^N \sum_{m=-n}^n T_{smn} \vec{K}_{smn}(\theta, \phi), \quad (5)$$

где T_{smn} — коэффициенты сферических волновых функций; s — индексы поляризации; n — полярный индекс, соответствующий углу θ ; m — азимутальный индекс, соответствующий углу ϕ ; N — число сферических гармоник, используемых для аппроксимации диаграммы направленности.

Исходными данными для определения коэффициентов T_{smn} являются измерения поля $w(A, \chi, \theta, \phi)$ на сфере радиуса A при сканировании по углам θ и ϕ и вращении зонда по углу χ (рис. 5). Коэффициенты T_{smn} определяются из решения уравнения наблюдения [3]:

$$w(A, \chi, \theta, \phi) = v \sum_{\substack{smn \\ \sigma\mu\nu}} T_{smn} e^{jm\phi} d_{\mu m}^n(\theta) e^{j\nu\chi} C_{\sigma\mu\nu}^{sn}(kA) R_{\sigma\mu\nu}^p; \quad (6)$$

$$\sum_{\substack{smn \\ \sigma\mu\nu}} \equiv \sum_{s=1}^2 \sum_{n=1}^N \sum_{m=-n}^n \sum_{\sigma=1}^2 \sum_{\mu=-\nu_{\max}}^{\nu_{\max}} \sum_{\nu=|\mu|}^{\nu_{\max}},$$

где ν — входной сигнал исследуемой антенны (рассматриваем измерение при работе ИА в режиме излучения); $d_{\mu\nu}^n(\theta)$ — коэффициенты, характеризующие преобразование системы координат при перемещении зонда по углу θ ; $R_{\sigma\mu\nu}^p$ — коэффициенты сферических волновых функций зонда; $C_{\sigma\mu\nu}^{sn}(kA)$ — определяет преобразование коэффициентов $R_{\sigma\mu\nu}^p$ из начала системы координат на сферу радиуса A ; индексы σ, μ, ν аналогичны индексам s, m, n применительно к зондовой антенне.

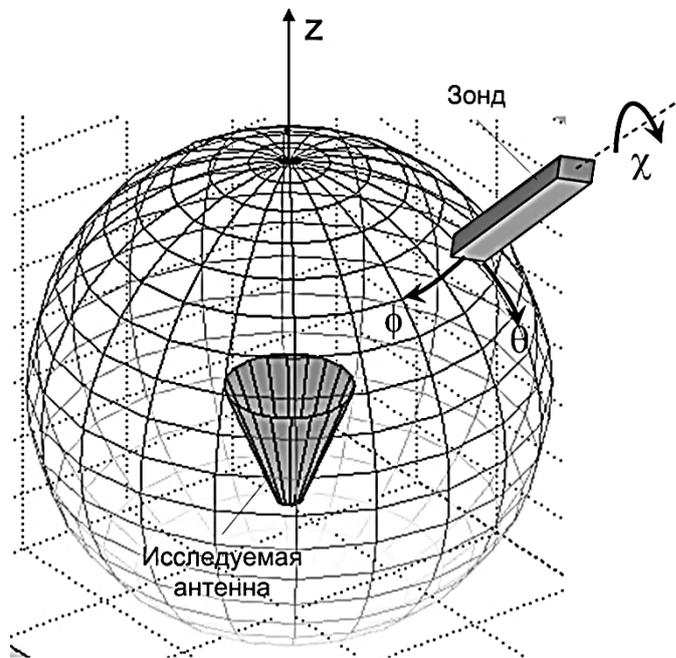


Рис. 5. Геометрия сферического сканирования

Путём последовательного интегрирования исходных данных по углам χ, ϕ и θ , с учётом преобразования системы координат, уравнение (6) сводится к системе уравнений вида (7) относительно неизвестных T_{1mn} и T_{2mn} :

$$\nu T_{1mn} P_{1\mu\nu}(kA) + \nu T_{2mn} P_{2\mu\nu}(kA) = w_{\mu\nu}^n(A), \quad (7)$$

где $P_{s\mu\nu}(kA) = \frac{1}{2} \sum_{\sigma\nu} C_{\sigma\mu\nu}^{sn}(kA) R_{\sigma\mu\nu}^p$ — характеристика зонда на сфере радиуса A ;

$w_{\mu\nu}^n(A)$ — результат интегрирования поля на сфере.

Процедура измерения и алгоритм обработки существенно упрощаются при использовании зондов, удовлетворяющих условию $\mu = \pm 1$. Такими зондами являются, например, электрический диполь или конический рупор. Однако на некотором удалении от ИА мода $\mu = \pm 1$ преобладает и в поле зондов других типов, например, прямоугольного волновода или прямоугольного рупора, которые также могут успешно использоваться при сферическом сканировании.

Для зондов с $\mu = \pm 1$ достаточно выполнить измерение ближнего поля при двух положениях однопортового линейно-поляризованного зонда по углу χ : $\chi = 0^\circ$ и $\chi = 90^\circ$, что естественным образом соответствует измерению ϕ -й и θ -й компонент поля.

Уравнение (7) для $\mu = \pm 1$ сводится к системе из двух уравнений:

$$\begin{aligned} vT_{1mn}P_{11n}(kA) + vT_{2mn}P_{21n}(kA) &= w_{1m}^n(A); \\ vT_{1mn}P_{1,-1,n}(kA) + vT_{2mn}P_{2,-1,n}(kA) &= w_{-1m}^n(A). \end{aligned} \quad (8)$$

После решения системы уравнений (8) относительно T_{1mn} и T_{2mn} поле в дальней зоне рассчитывается в соответствии с (5).

Прямое измерение коэффициента усиления. После определения коэффициентов T_{1mn} и T_{2mn} может быть непосредственно рассчитан КУ антенны. Для расчёта КУ используется эквивалентная форма формулы Фрисса, полученная в [3] в виде:

$$\frac{\frac{1}{2}|W|^2}{\frac{1}{2}|v|^2} = \frac{G_p G_t}{4}, \quad (9)$$

где G_p — КУ эталонного зонда; G_t — КУ ИА; v — сигнал на входе ИА; W — нормализованный сигнал в дальней зоне [3], определяемый, как

$$W(\chi, \theta, \phi) = \lim_{kA \rightarrow \infty} \left[w(A, \chi, \theta, \phi) \frac{kA}{e^{jkA}} \right], \quad (10)$$

где k — волновой множитель.

Нормализованный сигнал (10) вычисляется на основе уравнения наблюдения (6), как сигнал бесконечно удалённого зонда:

$$W(\chi, \theta, \phi) = v \sum_{\substack{smn \\ \mu=\pm 1}} T_{smn} e^{jm\phi} d_{\mu m}^n(\theta) e^{jm\chi} P_{s\mu n}^\infty. \quad (11)$$

На бесконечном удалении от ИА любой зонд, с точки зрения своих направленных свойств, может рассматриваться как электрический диполь. Поэтому в качестве характеристики зонда $P_{s\mu n}^\infty$ в (11) используем характеристику электрического диполя в дальней зоне [3]:

$$P_{s1n}^{\infty} = -\frac{\sqrt{6}}{8} j^{-n} \sqrt{2n+1};$$

$$P_{s,-1,n}^{\infty} = (-1)^s \frac{\sqrt{6}}{8} j^{-n} \sqrt{2n+1}.$$
(12)

После расчёта, согласно (11), нормализованного сигнала дальней зоны $W(\chi, \theta, \phi)$, КУ G_t определяется из уравнения (9):

$$G_t(\theta, \phi) = \frac{4}{G_p} \frac{|W(\theta, \phi)|^2}{|v|^2}.$$
(13)

Ближнее поле на сфере измеряется относительно заданного уровня входного сигнала v с точностью до некоторой постоянной величины c , определяемой ослаблением приёмо-передающего тракта. Поскольку алгоритм преобразования данных ближнего поля sw в дальнюю зону линеен, полученный сигнал дальней зоны cW известен с точностью до той же постоянной величины. Константа c определяется в ходе калибровки приёмо-передающего тракта путём измерения затухания сигнала между портами векторного анализатора цепей при прямом соединении входа ИА и выхода зонда.

Прямое измерение ЭИИМ. В соответствии с определением эквивалентной изотропной излучаемой мощности, используемым в [3]:

$$\Pi = \frac{1}{2} |v|^2 G_t.$$
(14)

Тогда (9) можно записать в виде:

$$\frac{1}{2} |W|^2 = \frac{G_p \Pi}{4}.$$
(15)

Для измерения ЭИИМ не требуется осуществлять калибровку приёмо-передающего тракта. Однако относительные измерения ближнего поля $w(A, \chi, \theta, \phi)$ должны быть дополнены одним измерением абсолютного уровня мощности P_m в некоторой точке (A, θ_m, ϕ_m) , как правило, соответствующей максимальному уровню ближнего поля. В результате определяется калибровочный коэффициент K , позволяющий связать относительный уровень распределения ближнего поля на сфере с его абсолютной мощностью:

$$K = \frac{P_m}{\frac{1}{2} |w(\theta_m, \phi_m)|^2}.$$
(16)

Нормализованный сигнал дальней зоны $W(\chi, \theta, \phi)$ рассчитывается согласно (11) без учёта влияния приёмо-передающего тракта. ЭИИМ определяется из уравнения (15) с учётом калибровочного коэффициента (16):

$$\Pi(\theta, \phi) = \frac{2K}{G_p} |W(\theta, \phi)|^2.$$
(17)

Экспериментальные результаты. Рассмотренные алгоритмы были апробированы при измерении КУ и ЭИИМ эталонной рупорной антенны с прямоугольным раскрытием размером 15×11.5 см, диапазона 5.85...8.2 ГГц со стандартным волноводным фланцем WR-137 производства компании Penn Engineering.

Измерения проводились в безэховой камере НПП «ТРИМ». В качестве зондовой антенны использовался открытый конец волновода WR-137 того же частотного диапазона, что и ИА. Генерация и приём измерительных сигналов осуществлялись с помощью ВАЦ R&S ZVA40.

Радиус сферы сканирования составил $A = 50$ см, шаг сканирования $\Delta\theta = \Delta\phi = 1.5^\circ$, диапазон углов сканирования: $\theta = 0^\circ \dots 90^\circ$, $\phi = -180^\circ \dots 180^\circ$. Для аппроксимации поля в дальней зоне использовалось $N = 40$ сферических гармоник.

КУ рупорной антенны G_t , полученный в соответствии с рассмотренным алгоритмом, показан на рис. 6 в сравнении с эталонными значениями, представленными производителем. Максимальное отличие в рабочей полосе частот не превышает 0.2 дБ.

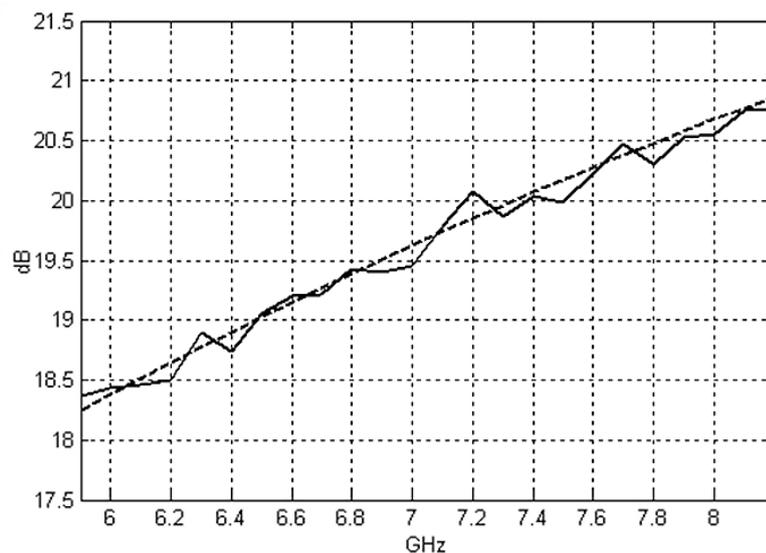


Рис. 6. Измеренный (—) и эталонный (---) коэффициенты усиления рупорной антенны

При измерении ЭИИМ с выхода ВАЦ на вход рупора подавался сигнал с уровнем мощности +10 дБм. Далее, с учётом затухания в подводящем кабеле L и КУ рупора G_{et} , были рассчитаны мощность на входе рупора P_{in} и значения ЭИИМ в полосе частот, которые при проведении данного измерения были приняты в качестве эталонных.

Измерения ближнего поля на сфере выполнялись так же, как и при измерении КУ. Затем было определено направление ($\theta_m = 0^\circ$, $\phi_m = 0^\circ$), соответствующее максимуму ближнего поля, и произведено измерение мощности сигнала $P_m(\theta_m, \phi_m)$ на выходе приёмного зонда в этом направлении. Измерение осуществлялось с помощью ВАЦ в режиме измерения абсолютной мощности. После расчёта калибровочного коэффициента K и нормализованного сигнала дальней зоны W согласно (17) были рассчитаны значения ЭИИМ в рабочей полосе частот рупора (рис. 7). Максимальная дополнительная погрешность Δ метода измерения ближнего поля на сфере, в данном случае, не превышает 0,5 дБ.

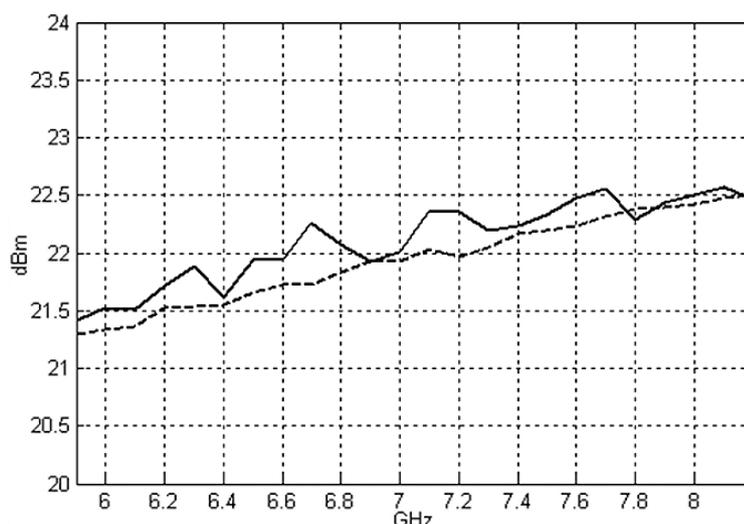


Рис. 7. Измеренная (—) и эталонная (---) эквивалентная изотропная излучаемая мощность

Измерение КУ методом трёх антенн в плоском сканере [11]. О возможности применения метода трёх антенн в планарных сканерах упоминалось в [7]. В этой статье предлагалось в комплекте из трёх антенн использовать два слабонаправленных зонда и ИА. При этом отмечалось, что метод редко применяется на практике из-за больших ошибок, возникающих при измерении в комбинации «зонд–зонд». Действительно, использование в данной комбинации слабонаправленного зонда в качестве ИА не соответствует условиям измерений в планарном сканере.

В [12] приводятся результаты измерения КУ с помощью набора из трёх антенн, состоящего из открытого конца волновода и двух рупорных антенн, одна из которых используется в качестве зонда, а вторая — в качестве ИА. Однако детали, важные для практического применения метода, не рассматриваются.

Алгоритм обработки измерений. На основе соотношения для расчёта КУ прямым методом (1) [7, 13] для каждой комбинации m, n зонда и ИА можно записать:

$$G_m(\vec{K}_0)G_n(\vec{K}_0) = \left(\frac{4\pi}{\lambda^2}\right)^2 \frac{\left|\Delta^2 \sum_j S(\vec{P}_j) e^{-i\vec{K}_0 \cdot \vec{P}_j}\right|_{mn}^2}{L},$$

$$m, n = 1, 2, 3; m \neq n; \quad (18)$$

$$G_m(\vec{K}_0)G_n(\vec{K}_0) \equiv G_n(\vec{K}_0)G_m(\vec{K}_0),$$

где $G_m(\vec{K}_0), G_n(\vec{K}_0)$ — КУ зонда и ИА в направлении максимума диаграммы направленности, заданного вектором \vec{K}_0 .

Выражение в числителе (18) представляет собой максимум эквивалентного сигнала дальней зоны, в логарифмическом масштабе:

$$F_{mn} = 10 \lg \left[\left| \Delta^2 \sum_j S(\vec{P}_j) e^{-i\vec{K}_0 \cdot \vec{P}_j} \right|_{mn}^2 \right]. \quad (19)$$

С учётом потерь в тракте, величина максимума

$$M_{mn} = F_{mn} - L_{[dB]}. \quad (20)$$

Решая систему уравнений (18), с учётом (19) и (20), получим выражения для расчёта КУ:

$$\begin{aligned} G_{1[dB]} &= 0.5(M_{12} + M_{13} - M_{23}) + R; \\ G_{2[dB]} &= 0.5(M_{12} + M_{23} - M_{13}) + R; \\ G_{3[dB]} &= 0.5(M_{13} + M_{23} - M_{12}) + R, \end{aligned} \quad (21)$$

где $R = 10 \lg(4\pi / \lambda^2)$.

Конфигурация измерений в ближнем поле, соответствующая (21), показана в табл. 1:

Таблица 1

№ измерения	Зонд	ИА	Уравнение передачи
1	Антенна-1	Антенна-2	$M_{12} = F_{12} - L = G_1 + G_2 - R$
2	Антенна-1	Антенна-3	$M_{13} = F_{13} - L = G_1 + G_3 - R$
3	Антенна-2	Антенна-3	$M_{23} = F_{23} - L = G_2 + G_3 - R$

Экспериментальные исследования метода трёх антенн в плоском сканере. Для экспериментальных исследований был взят следующий набор антенн:

1) Антенна-1 — открытый конец волновода WR-112;

- 2) Антенна-2 — эталонный рупор с раскрывом 9×13.5 см, с широкополосным коаксиально-волноводным переходом, с нижней частотой ~ 7.5 ГГц;
- 3) Антенна-3 — стандартный рупор *Penn Engineering* диапазона 7.05... 10.0 ГГц.

Измерения № 1 и 2 (табл. 1) являются обычными измерениями в плоском сканере. В качестве зонда в них используется слабонаправленная антенна в виде открытого конца волновода с расстоянием дальней зоны порядка 2–3 длин волн. В измерении № 3 в качестве зонда используется рупорная антенна с КУ 18–20 дБ, выраженными боковыми лепестками и расстоянием дальней зоны порядка 1.2 м, сходная с ИА. Таким образом, при стандартном рекомендуемом расстоянии от плоскости сканирования до апертуры ИА $(3 \dots 5) \lambda$ [4, 6] измерение АФР ближнего поля ИА происходит в ближнем поле зондовой антенны.

В соответствии с табл. 1 были выполнены измерения АФР и согласно (18–21) рассчитаны значения КУ всех трёх антенн. Полученные значения КУ показаны на рис. 8–10 в сравнении с референтными («эталонными») значениями. В качестве последних приняты: для Антенны-1 — КУ, измеренный методом двух антенн; для Антенны-2 — КУ, измеренный методом трёх антенн в дальней зоне; для Антенны-3 — характеристика, представленная производителем.

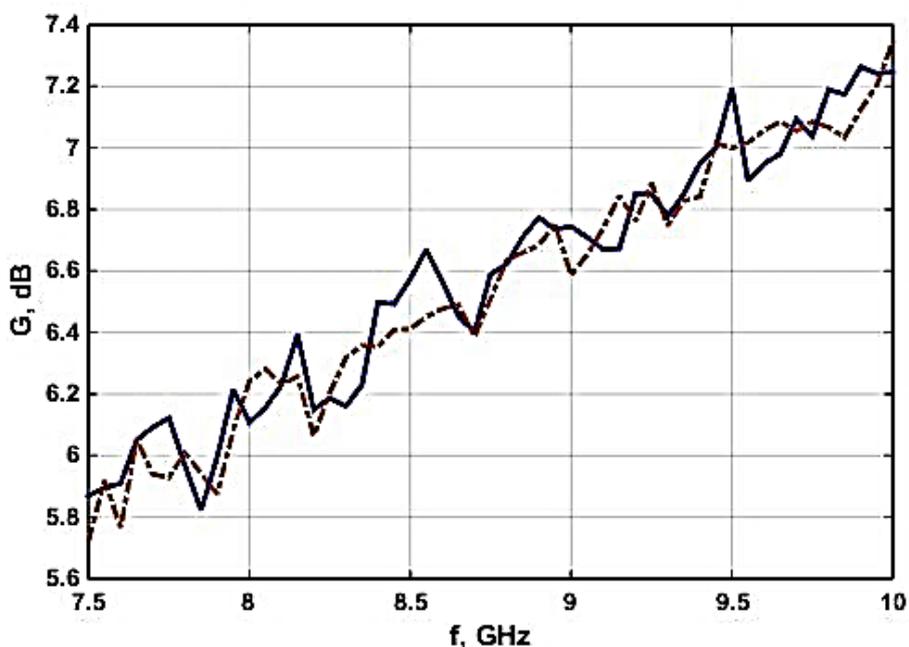


Рис. 8. КУ открытого конца волновода WR-112 (Антенна-1):

— метод трёх антенн в ближней зоне; - - - метод двух антенн

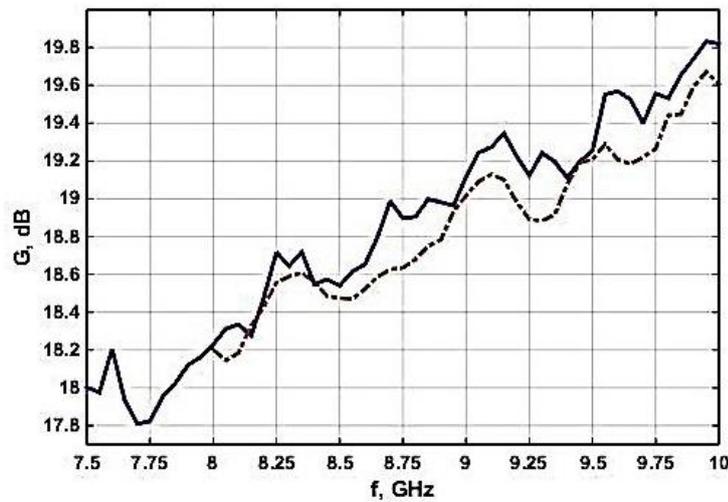


Рис. 9. КУ рупора *TRIM* (Антенна-2): — метод 3-х антенн в ближней зоне; — метод 3-х антенн в дальней зоне

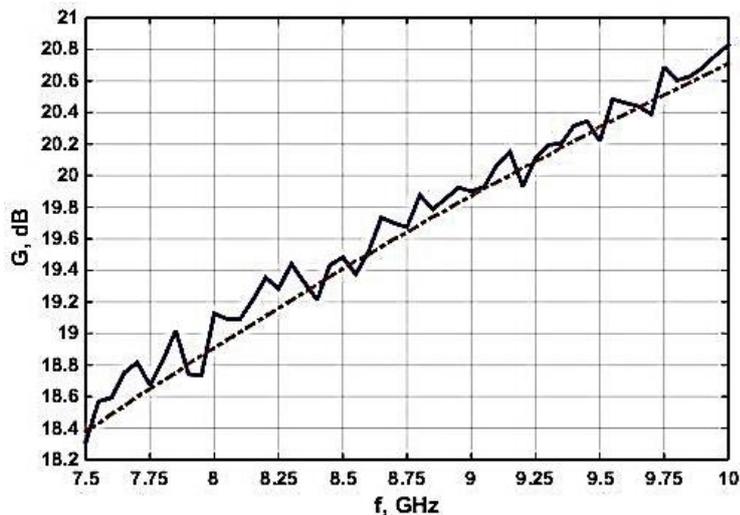


Рис. 10. КУ рупора *Penn Engineering* (Антенна-3): — метод 3-х антенн в ближней зоне; — данные производителя

Рассмотренный метод измерения является в полтора раза более затратным по времени по сравнению с методом сравнения и в три раза — по сравнению с прямым методом. Его целесообразно использовать при отсутствии в составе АИВК эталонной антенны или калиброванного зонда требуемого частотного диапазона, а также в тех случаях, когда измерения КУ требуется выполнить с максимально возможной точностью. Этот способ измерения применим для антенн с не отклонённым положением луча.

Программное обеспечение АИВК

Важнейшей частью современных автоматизированных измерительно-вычислительных комплексов является программное обеспечение. В 2014–2017 гг. в НПП «ТРИМ СШП Измерительные системы» был разработан принципиально новый программный продукт, предназначенный для проведения измерений, выполнения расчётов и визуализации характеристик параметров антенн, радиолокационных объектов и полезной нагрузки (ПН).

В рамках данного программного комплекса поддерживаются измерительные сценарии, расчёты, обработка и визуализация результатов для широкого спектра измерений, в том числе:

- а) сечений и объёмных диаграмм направленности (ДН) антенн в дальней зоне;
- б) антенных измерений в ближней зоне (плоское, цилиндрическое и сферическое сканирование), в том числе измерений коэффициента усиления различными методами;
- в) измерений КУ, поляризационных характеристик (ПХ), эффективной изотропно излучаемой мощности различными методами в дальней зоне.

Структура программного комплекса включает в себя следующие составные элементы (рис. 11):

- а) программу измерений MeasurementCentre;
- б) базу данных (БД);
- в) программу расчёта и визуализации ProViLab.

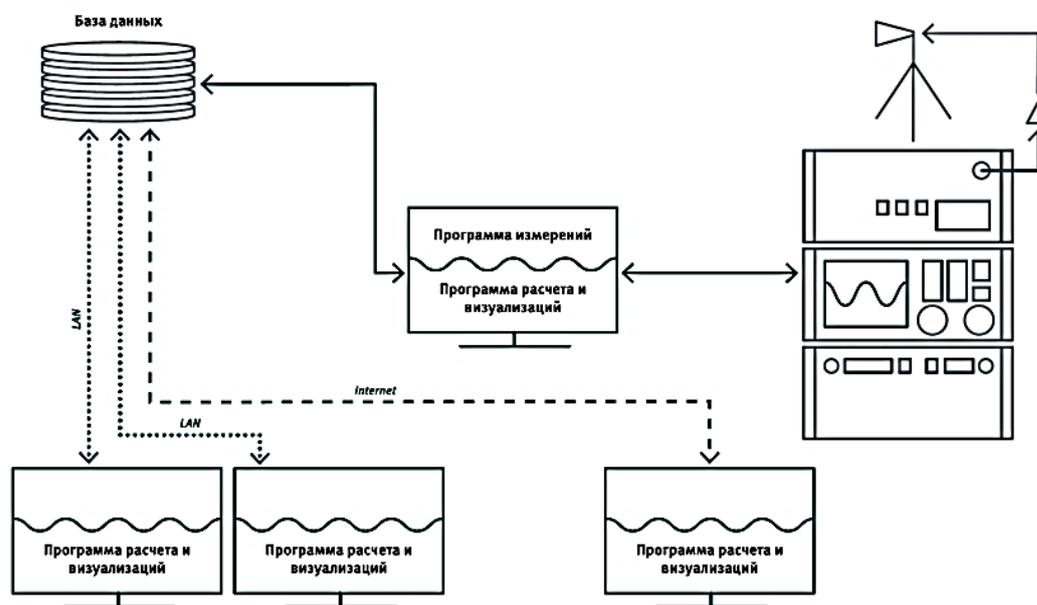


Рис. 11. Структура программного комплекса

Программа MeasurementCentre обеспечивает возможности непосредственного проведения измерения, мониторинга, настройки оборудования. Измерения проводятся по формализованным сценариям, которые могут быть составлены как специалистами НПП «ТРИМ СШП Измерительные системы», так и компетентными сотрудниками предприятия-заказчика. Это позволяет максимально упростить и автоматизировать деятельность операторов и при этом сохранить возможность проведения нестандартных измерений.

Программа ProViLab представляет собой современный САД (рис. 12), обеспечивающий проведение расчётов, анализ и отображение данных измерений, а также формирование отчётов и поддержку решения широкого круга вспомогательных инженерных задач, связанных с обработкой информации. Основным инструментарием программы является набор высокоинтегрированных средств визуализации и выполнения расчётов, дающий широкие возможности как для решения нетривиальных исследовательских задач, так и для автоматизации рутинных операций, в том числе по созданию шаблонов отчётов.

Среди особенностей данной программы можно выделить:

- а) удобный интерфейс пользователя, обеспечивающий интерактивное управление расчётами и способами визуализации непосредственно из графических представлений;
- б) высокую скорость расчётов, практически мгновенное получение результата в большинстве задач обработки данных;
- в) поддержку произвольной компоновки экранных и печатных форм, простоту составления отчётов;
- г) возможность использования отчёта в качестве шаблона для однотипных измерений, возможность автоматической замены измерения во всём отчёте;
- д) широкий набор средств 2D- и 3D-визуализации результатов измерений и расчётов, гибкие настройки отображения;
- е) большой выбор инструментов исследования, сравнения и преобразования графиков и диаграмм.

Выбранная структура программного комплекса (рис. 11) обеспечивает:

- а) прозрачное взаимодействие между компонентами системы: результаты измерений, выполненных программой MeasurementCentre, мгновенно доступны для просмотра и расчётов в программе ProViLab;
- б) возможность различных конфигураций рабочей сети: от одного рабочего места, где установлены все части программного комплекса, до вариантов, когда с результатами измерений одновременно работает множество операторов за произвольным количеством машин, где установлена программа ProViLab;
- в) использование современной реляционной системы управления БД обеспечивает надёжное хранение больших объёмов информации. При этом

в программах комплекса предоставляются развитые средства по автоматизации работы с перечнями выполненных измерений, объектов измерения, зондов, эталонных антенн и т.д. В частности, есть функции поиска/фильтрации и динамической иерархической группировки измерений по различным атрибутам (тип измерения, объект измерения, дата, оператор, пользовательские атрибуты и т.д.). Таким образом, нахождение нужного измерения не составляет труда даже при наличии тысяч измерений в БД.

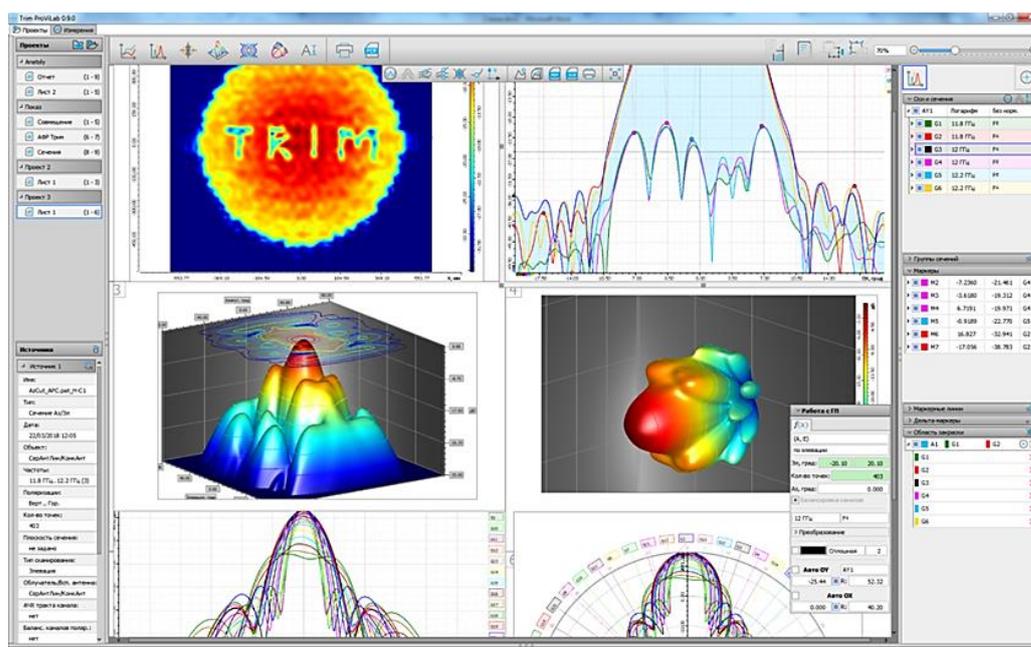


Рис. 12. Скриншот программы расчёта и визуализации ProViLab

Описываемый программный комплекс предлагает богатые средства поддержки проведения и обработки результатов антенных измерений, обладающие выгодными отличиями по целому ряду аспектов.

В контексте поддержки проведения измерительных процедур программа MeasurementCentre обеспечивает:

- а) реализацию автоматизированных и интерактивных пошаговых сценариев измерения;
- б) автоматизированное формирование исполняемых сценариев для разных типов измерений;
- в) формирование открытой расширяемой библиотеки типов измерений и модулей управления оборудованием;
- г) применение в процессе измерения разнообразного радиотехнического и механического оборудования собственной разработки и производства мировых лидеров в данной области;

- д) поддержку типовых процедур, таких как поиск максимума, снятие амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) тракта, калибровка, ручное управление позиционером, мониторинг сигнала и т.п.;
- е) визуальное формирование коммутационных схем оборудования для реализации разных измерительных задач;
- ж) создание и сохранение готовых к использованию описателей измерения — шаблонов.

Реализованное в ProViLab алгоритмическое обеспечение основывается на современных достижениях, описанных в мировой научной литературе по антенным измерениям [1–7], и собственных научных разработках предприятия [10, 11, 14, 15]. В этом контексте следует выделить возможности:

- а) расчёта и отображение объёмных ДН и их сечений в различных системах координат $((A, E), (\alpha, \epsilon), (\theta, \varphi), (k^x, k^y))$ и поляризационных базисах (Ludwig-I, Ludwig-II, Ludwig-III, круговой);
- б) расчёта амплитудно-фазовых распределений (АФР) в апертуре антенны и на произвольном расстоянии от плоскости сканирования [14];
- в) автоматического расчёта параметров антенн (ПХ, коэффициента направленного действия (КНД), координат фазового центра [15], ширины ДН по заданному уровню, направления главного максимума).

Для работы с графиками и сечениями ДН в программе ProViLab реализованы развитые средства для работы с двумерными построениями, обеспечивающие в том числе:

- а) поддержку расчётов, отображения, преобразования и анализа сечений ДН, АФР, характеристик КУ, ПХ, КНД, ПН, АЧХ, временных сигналов, спектров и др.;
- б) широкие и гибкие возможности для преобразования и анализа графиков, в том числе арифметические операции, преобразование Фурье, оконные функции, сглаживание/фильтрация, интерполяция, преобразование единиц измерения, статистическая обработка;
- в) специализированные представления для работы с сечениями ДН, отображение в декартовых и полярных координатах;
- г) простые и интуитивно понятные механизмы управления произвольными группами графиков и сечений (выбор частот, поляризаций, видов и параметров расчётов и преобразований);
- д) маркеры с функциями поиска локальных и глобальных экстремумов, заданных значений, привязки к другим маркерам;
- е) маркерные линии (отображение значений всех графиков для некоторой координаты), дельта-линии между маркерами, настраиваемые области закрашки, отображение легенд и другие возможности.

В программе ProViLab реализован богатый набор средств трёхмерной визуализации (рис. 13) АФР, объёмных ДН, поляризационных характеристик, обеспечивающий в том числе:

- а) построение спектрограмм и аксонометрических проекций, отображение линиями равного уровня;
- б) возможность интерактивного задания произвольных сечений объёмных поверхностей;
- в) удобные механизмы работы с маркерами, автоматический поиск локальных и глобальных экстремумов;
- г) поддержку совместной визуализации и обработки нескольких объёмных поверхностей на одном построении, в том числе усреднение, построение разностей и отношений поверхностей, разброса, СКО, совмещение нескольких ДН (например, для разных лучей);
- д) широкие возможности настройки отображения (линии равного уровня, управление градиентами, способами заливки, отображение сеткой и т.д.).

Среди других особенностей программного обеспечения НПП «ТРИМ СШП Измерительные системы» можно выделить:

- а) возможность перевода интерфейса на различные языки и адаптации под региональные стандарты;
- б) поддержку проведения измерений, обработки данных и отображения результатов с использованием литерных частот;
- в) заложенную на этапе проектирования модульную архитектуру, дающую возможность расширения функциональности и адаптации программного обеспечения под специфические требования конкретного заказчика;
- г) экспорт изображений и результатов измерений и расчётов в различные сторонние форматы (GRASP, xls, txt, pdf, png, jpeg и др.).

Рассмотренный перечень средств и инструментов, реализованных в программном комплексе, обеспечивает высокую степень автоматизации процессов измерения, обработки и анализа данных.

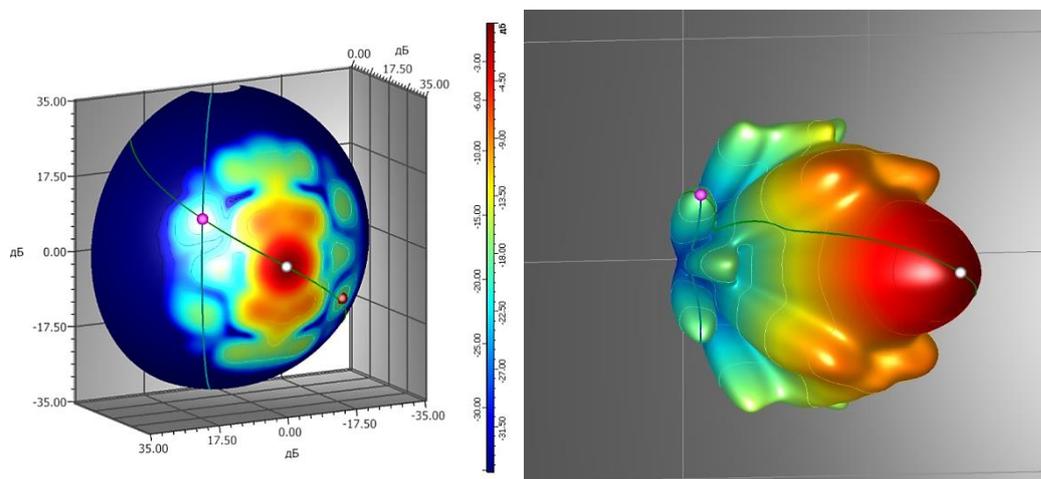


Рис. 13. Трёхмерная визуализация в ProViLab

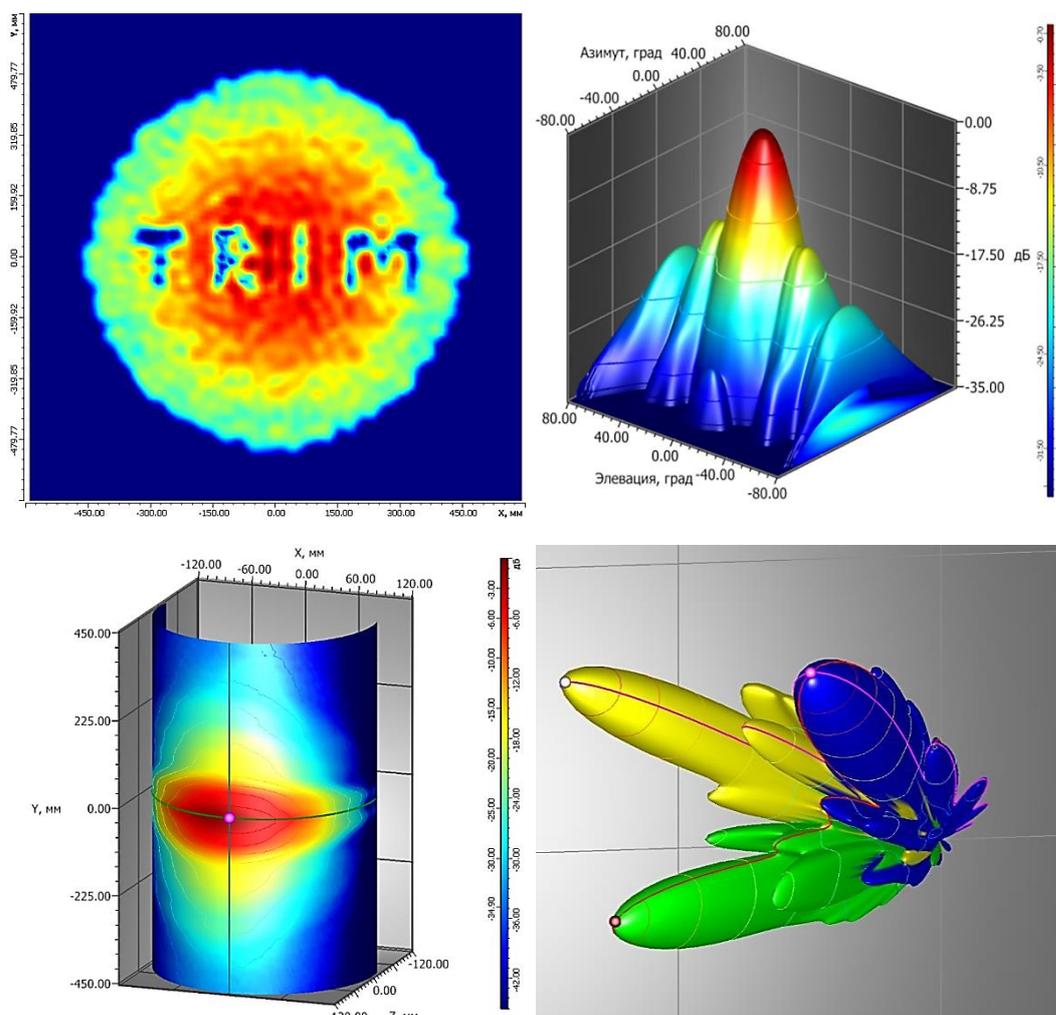


Рис. 13. Трёхмерная визуализация в ProViLab

Литература

1. Evans G. Antenna measurement techniques. London: Artech House Inc., 1990.
2. Parini C., Gregson S., McCormic J., Daniel J. Theory and Practice of Modern Antenna Range Measurements (Electromagnetic waves series, V. 55). London: Institution of Engineering and Technology, 2015.
3. Hansen J. Spherical near-field antenna measurements theory and practice (Electromagnetic waves series, V. 26). London: Institution of Electrical Engineers, 1988.
4. IEEE Recommended Practice for Near-Field Antenna Measurements. Antenna Standards Committee of the IEEE Antennas and Propagation Society, IEEE Std 1720™–2012.

5. Методы измерений параметров излучающих систем в ближней зоне / Бахрах Л.Д. и др. Л.: Наука, 1985.
6. Gregson S., McCormic J., Parini C. Principles of Planar Near-Field Antenna Measurements (Electromagnetic waves series, V. 53). London: Institution of Engineering and Technology, 2007.
7. Newell A., Ward R., McFarlane J. Gain and power parameter measurements using planar near-field techniques // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. V. 36. № 6. 1988.
8. Doren W. Measurement of EIRP and antenna response for active antennas with spherical near-field scanning. Antenna Measurements and SAR, 2004. AMS 2004. IEEE.
9. Brian B. Spherical near-field antenna measurement note: insertion loss gain measurement. 30th Antenna Measurement Techniques Association Annual Symposium (AMTA 2008).
10. Калинин Ю.Н., Чавдарь М.А. Прямое измерение коэффициента усиления и эквивалентной изотропно-излучаемой мощности антенны в сферических сканерах ближнего поля // Антенны. 2016. № 11. С. 56–61.
11. Калинин Ю.Н., Чавдарь М.А. Измерение коэффициента усиления методом трёх антенн в планарных сканерах ближнего поля // Вестник метролога. 2017. № 1. С. 10–14.
12. Masters G., Pelland P. Selection criteria for near-field gain techniques. 35th Antenna Measurement Techniques Association Annual Symposium (AMTA 2013). Columbus, Ohio, October 6–11, 2013.
13. Newell A. Planar near-field gain measurements to verify calibration of probes and gain standards. 23th Antenna Measurement Techniques Association Annual Symposium (AMTA 2001). Denver, Colorado, October 21–26, 2001.
14. Калинин Ю.Н. Измерение диаграмм направленности антенн в планарном сканере без измерения фазы // Антенны. 2015. № 1. С. 61–68.
15. Калинин Ю.Н. Измерение координат фазового центра антенны // Антенны. 2014. № 4. С. 54–62.