

**ИССЛЕДОВАНИЕ ЭКВИВАЛЕНТНОГО УРОВНЯ
ПОМЕХ ИЗМЕРЕНИЙ ХАРАКТЕРИСТИК АНТЕНН
В БЛИЖНЕЙ ЗОНЕ**

Н.В. Анютин

*ФГУП «ВНИИФТРИ», Менделеево, Московская обл., Россия,
anyutin@vniiftri.ru*

Аннотация. С помощью разработанной математической модели измерений на антенных измерительных комплексах ближней зоны были оценены погрешности измерений внешних характеристик антенн: коэффициента усиления, амплитудной и фазовой диаграмм направленности, уровня кросс-поляризации и коэффициента эллиптичности. Исследована связь погрешностей измерений внешних характеристик антенн с погрешностью восстановления электромагнитного поля в дальней зоне. Предложен способ для выражения погрешности измерений всех внешних характеристик антенн через единственную характеристику — эквивалентный уровень помех.

Ключевые слова: антенны, погрешности, коэффициент усиления, амплитудная и фазовая диаграммы направленности.

**STUDY OF THE EQUIVALENT LEVEL
OF INTERFERENCE IN THE MEASUREMENT
OF ANTENNA CHARACTERISTICS IN THE NEAR ZONE**

N.V. Anyutin

*FSUE «VNIIFTRI», Mendeleevo, Moscow region, Russia,
anyutin@vniiftri.ru*

Annotation. Using the developed mathematical model of measurements on antenna measuring complexes of the near zone, the uncertainties of measurements external characteristics of antennas: of the gain, amplitude and phase angular patterns, the level of cross-polarization and the coefficient of ellipticity were estimated. The connection between measurement uncertainties external characteristics of antennas and the uncertainty of reconstructing the electromagnetic field in the far zone is investigated. A method is proposed for expressing the measurement uncertainty of all external characteristics of antennas through a single characteristic — the equivalent level of interference.

Key words: antennas, uncertainties, gain, amplitude and phase angular patterns.

Измерения характеристик антенн и антенных решёток (АР) имеют важное значение при разработке и производстве систем связи, радионавигации, радиолокации и т.д. Средством измерений (СИ) характеристик антенн являются антенные измерительные комплексы (АИК), которые делятся на АИК дальней зоны (ДЗ), компактные полигоны и АИК ближней зоны (БЗ) [1].

Современные АР для обеспечения селекции принимаемых и излучаемых сигналов по углам имеют большую протяжённость апертуры D в длинах волн λ . Условия ДЗ, в которых определены внешние характеристики антенн, в таком случае обеспечиваются на расстоянии от десятков метров и более. Создание АИК ДЗ таких размеров или компактных полигонов под габариты современных АР требует существенно больше материальных затрат в сравнении с АИК БЗ. По этой причине АИК БЗ являются основным средством измерений внешних характеристик современных АР [2].

Метрологические характеристики АИК БЗ зависят от целого ряда факторов, в том числе от характеристик измеряемых антенн и АР. Погрешность измерений внешних характеристик зависит от относительного уровня L диаграммы направленности (ДН) и углов θ и φ в сферической системе координат. Нормирование метрологических характеристик в широком диапазоне множества параметров затрудняет как проведение испытаний в целях утверждения типа СИ, так и представление их результатов [3].

Цель работы — уменьшение объёма испытаний антенных измерительных комплексов ближней зоны и сокращение представления получаемых результатов. Для её достижения проводятся исследования зависимости погрешности измерений внешних характеристик антенн от погрешности восстановления электромагнитного поля в дальней зоне.

Электромагнитное поле \mathbf{F} в ДЗ имеет следующий вид:

$$\mathbf{F}(\mathbf{r}, \omega) = \mathbf{T}(\hat{\mathbf{r}}, \omega) e^{-ikr} / r, \quad (1)$$

где \mathbf{r} — радиус-вектор; ω — циклическая частота; \mathbf{T} — ДН антенны; k — волновое число; «крыша» — операция нормировки.

Из формулы (1) можно получить следующие внешние характеристики антенн:

– коэффициент усиления (КУ) G :

$$G(\hat{\mathbf{r}}, \omega) = cT(\hat{\mathbf{r}}, \omega) / W_0(\omega), \quad (2)$$

где c — скорость света в вакууме; W_0 — мощность, подводимая к антенне;

– амплитудная ДН (АДН) \hat{T} :

$$\hat{T}(\hat{\mathbf{r}}, \omega) = T(\hat{\mathbf{r}}, \omega) / T(\hat{\mathbf{r}}_0, \omega), \quad (3)$$

где $\hat{\mathbf{r}}_0$ — направление главного лепестка ДН;

– фазовая ДН (ФДН) $\hat{\Phi}$:

$$\hat{\Phi}(\hat{\mathbf{r}}, \omega) = \arg(T_{\xi}(\hat{\mathbf{r}}, \omega)) - \arg(T_{\xi}(\hat{\mathbf{r}}_0, \omega)), \quad (4)$$

где T_{ξ} — ко-поляризованная компонента;

– уровень кросс-поляризации (УК) C_{cr} :

$$C_{cr} = |T_R + T_L| / |T_R - T_L|, \quad (5)$$

где T_R и T_L — правая и левая круговые компоненты;

– коэффициент эллиптичности (КЭ) C_{el} :

$$C_{el} = (|T_R| - |T_L|) / (|T_R| + |T_L|). \quad (6)$$

Нетрудно заметить, что определённые по формулам (2)–(6) внешние характеристики зависят исключительно от вектора ДН \mathbf{T} . Таким образом, погрешность их измерений связана с погрешностью измерений ДН ΔT следующими формулами:

$$\Delta G = c/W_0 \Delta T^2 = c/W_0 10^{L_{eq}/10}, \quad (7)$$

$$\Delta \hat{T} = \Delta T / T = 10^{(L_{eq}-L)/20}, \quad (8)$$

$$\Delta \hat{\Phi} = \text{arctg} \Delta T / T = \text{arctg} 10^{(L_{eq}-L)/20}, \quad (9)$$

$$\Delta C_{cr} = \sqrt{2} \Delta T / T = 10^{(L_{eq}-L+3)/20}, \quad (10)$$

$$\Delta C_{el} = \sqrt{2} \Delta T / T = 10^{(L_{eq}-L+3)/20}, \quad (11)$$

где $L_{eq} = 20 \lg \Delta T$ — эквивалентный уровень аддитивной шумовой помехи, которая приводит к той же погрешности измерений ДН ΔT [4].

Формулы (7)–(11) позволяют связать погрешность измерений разных внешних характеристик с одной единственной характеристикой — эквивалентным уровнем помех L_{eq} . В общем случае эквивалентный уровень помех может отличаться для разных внешних характеристик. Однако в силу формул (2)–(6) можно ожидать, что отличия будут несущественными.

Для оценок эквивалентного уровня помех было проведено математическое моделирование измерений на АИК БЗ с помощью разработанной ранее математической модели [5]. Сканирование электромагнитного поля проводилось на частоте 30 ГГц ($\lambda = 10$ мм). В качестве исследуемой использовалась рупорная антенна П6-132 с размером апертуры $6,8\lambda \times 5,4\lambda$ ($x \times y$). С ней была связана глобальная Декартова система координат с началом в центре раскрытия. Ось Ox направлена вдоль большей стороны апертуры, Oy — вдоль меньшей стороны апертуры, Oz — перпендикулярно апертуре в направлении главного лепестка. Зондовой антенной служил открытый конец прямоугольного волновода сечением $0,72\lambda \times 0,34\lambda$ ($x \times y$). Поверхность сканирования была разбита на 800 треугольных facets на расстоянии не менее 3λ до исследуемой антенны. Коэффициент передачи измерялся в каждой точке только при ориентации зондовой антенны на согласованной и ортогональной поляризациях.

Результаты оценки эквивалентного уровня помех L_{eq} из модели измерений на АИК БЗ для КУ, АДН, ФДН, УК и КЭ приведены на рис. 1–5 соответственно. В них имеются следующие закономерности.

- 1) Эквивалентный уровень помех КУ, АДН и ФДН практически идентичен друг другу.
- 2) Эквивалентный уровень помех УК и КЭ отличается друг от друга и от эквивалентного уровня помех КУ, АДН и ФДН на постоянную величину.
- 3) Эквивалентный уровень помех КУ, АДН и ФДН незначительно зависит от относительного уровня.
- 4) Нормирование на величину в направлении главного лепестка ДН приводит к уменьшению эквивалентного уровня помех на 10 дБ в диапазоне углов, существенно меньшем в сравнении с шириной главного лепестка ДН.

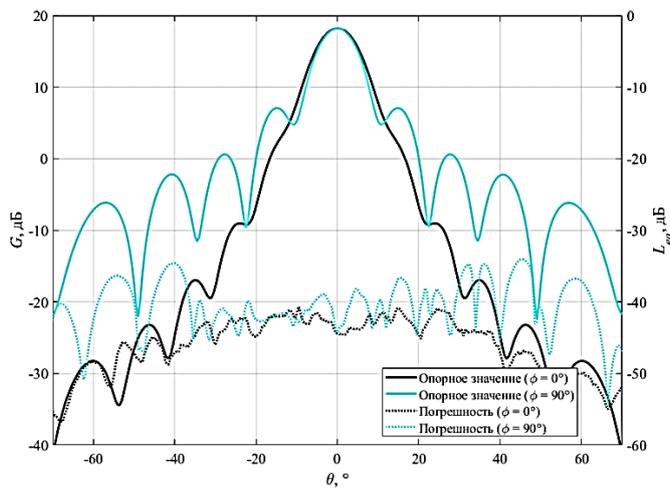


Рис. 1. Модель измерений КУ

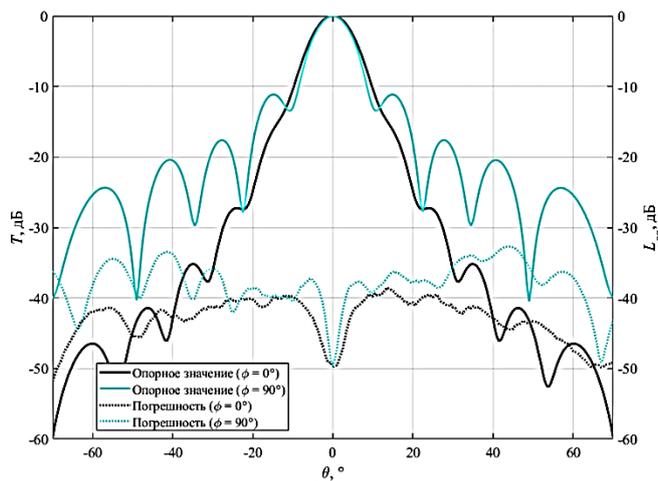


Рис. 2. Модель измерений АДН

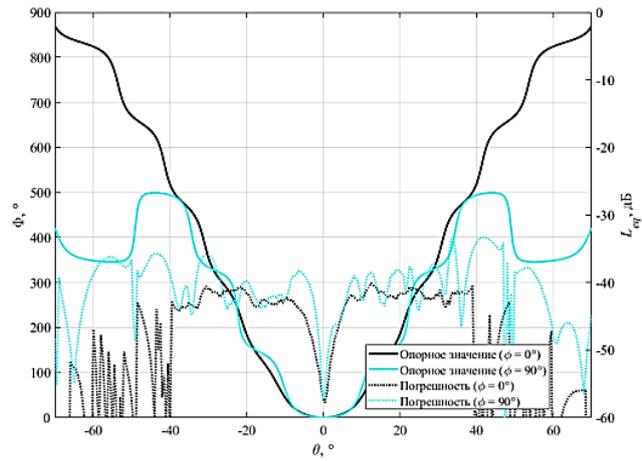


Рис. 3. Модель измерений ФДН

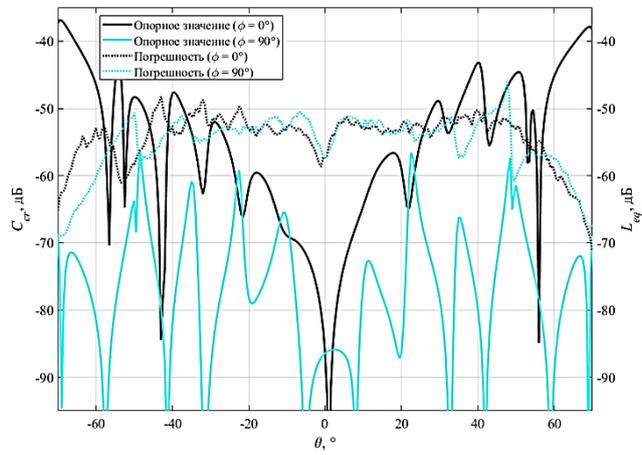


Рис. 4. Модель измерений УК

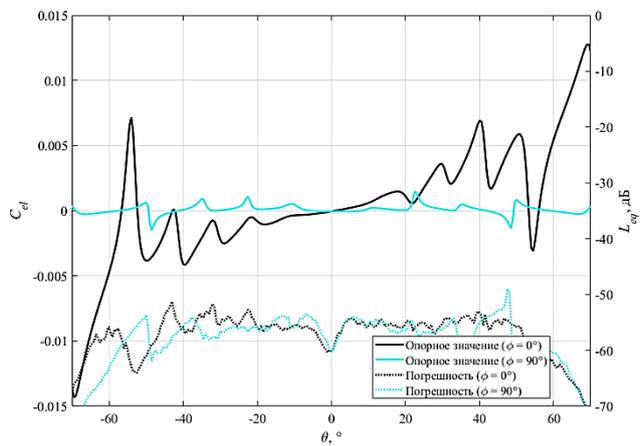


Рис. 5. Модель измерений КЭ

По результатам полученных оценок эквивалентного уровня помех можно сделать следующие выводы:

1. Ограничившись наихудшей величиной эквивалентного уровня помех, через неё можно выразить погрешность измерений каждой из внешних характеристик антенн.
2. Введя постоянные поправки, погрешность измерений всех внешних характеристик антенн можно связать с одной величиной эквивалентного уровня помех.

Таким образом, при испытаниях антенных измерительных комплексов ближней зоны можно ограничиться оценкой эквивалентного уровня помех для единственной антенны и использовать его для выражения погрешности измерений внешних характеристик произвольных антенн.

Список литературы

1. Balanis C.A. (ed.) Modern antenna handbook. — John Wiley & Sons, 2011.
2. Yaghjian A. An overview of near-field antenna measurements // IEEE Transactions on antennas and propagation. — 1986. — Т. 34. — No. 1. — С. 30–45.
3. Малай И.М., Шкуркин М.С. Применение метода статистических испытаний для оценки метрологических характеристик антенных автоматизированных измерительных комплексов ближней зоны // Антенны. — 2014. — № 12. — С. 50–55.
4. Newell A.C., Hindman G.E. Antenna pattern comparison using pattern subtraction and statistical analysis // Proceedings of the 5th European Conference on Antennas and Propagation (EUCAP). — IEEE, 2011. — С. 2537–2540.
5. Анютин Н.В., Малай И.М. Математическая модель измерений характеристик антенн в ближней зоне излучения // Альманах современной метрологии. — 2021. — № 1 (25). — С. 44–66.

Статья поступила в редакцию: 08.10.2021 г.

Статья прошла рецензирование: 14.10.2021 г.

Статья принята в работу: 21.10.2021 г.