

# ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ СОВМЕСТИМОСТЬ И БЕЗОПАСНОСТЬ ОБОРУДОВАНИЯ

УДК 621.396.677; 621.397.671

## ПОЛЯРИЗАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ИЗЛУЧЕНИЯ ТРЕХАПЕРТУРНОЙ СЛУЧАЙНОЙ АНТЕННЫ

Аверьянова А.Н., Маслов О.Н., Раков А.С.

Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики, Самара, РФ

E-mail: maslov@psati.ru

Методом статистического имитационного моделирования исследованы поляризационные характеристики электромагнитного поля, создаваемого трехэлементной апертурной случайной антенной (АСА). Представлены гистограммы случайных значений азимутальных и меридиональных углов, иллюстрирующие стохастическую поляризацию векторов поля АСА заданной конфигурации.

**Ключевые слова:** статистическая теория антенн, апертурные случайные антенны, векторы электрического и магнитного поля, стохастическая поляризация, метод статистического имитационного моделирования

### Введение

Основным отличием теории случайных антенн (СА) от статистической теории антенн (СТА) является переход от понятия «случайная ошибка» применительно к амплитудам, фазам, пространственным координатам и временным сдвигам, которое является ключевым в СТА, к понятию «неопределенность знаний» об СА, которые необходимы для их исследования и моделирования [1-4]. Неопределенными в СА (с учетом неочевидности наличия в природе тех или иных ошибок) могут быть также конфигурация СА, число работоспособных элементов и даже сам факт существования СА в данный момент времени. Из традиционных параметров антенн при этом следует каждый раз выбирать наиболее подходящие для анализа эффективности конкретных СА – с учетом того, что само понятие этой эффективности также отличается от используемых в теории антенн и СТА. Наилучшими характеристиками излучающей СА – с точки зрения решения прикладных задач [1] – являются гистограммы электрической  $E$ - и магнитной  $H$ -составляющих электромагнитного поля (далее для краткости  $E$ -поля и  $H$ -поля) в заданной пространственно-частотно-временной области.

Цель статьи – анализ поляризационных свойств поля апертурной СА (далее АСА), которые представляют самостоятельный интерес и связаны как с развитием СТА, так и с пересмотром ряда принципов, присущих теории антенн.

### Поляризационные свойства $E$ -поля и $H$ -поля, исследуемые в СТА

Традиционное понятие поляризации плоской волны, распространяющейся вдоль оси  $z$ , относит-

ся к гармоническому режиму (ГР) работы антенны, поскольку тип поляризации зависит от соотношения между уровнями и фазами двух комплексных амплитуд ортогональных составляющих (ОС) векторов  $E$ -поля и  $H$ -поля (например  $\dot{E}_x$  и  $\dot{E}_y$ ) или магнитного поля ( $\dot{H}_x$  и  $\dot{H}_y$ ). Если фазы ОС векторов одинаковы, поляризация будет линейной, если присутствует сдвиг фаз на  $\pm 90^\circ$  и уровни ОС одинаковы – то круговой, в общем случае она является эллиптической и т.д. При этом передающая и приемная антенны должны быть согласованы по поляризации во избежание энергетических потерь – особенно в открытом пространстве, которое собственными «полярообразующими» свойствами не обладает.

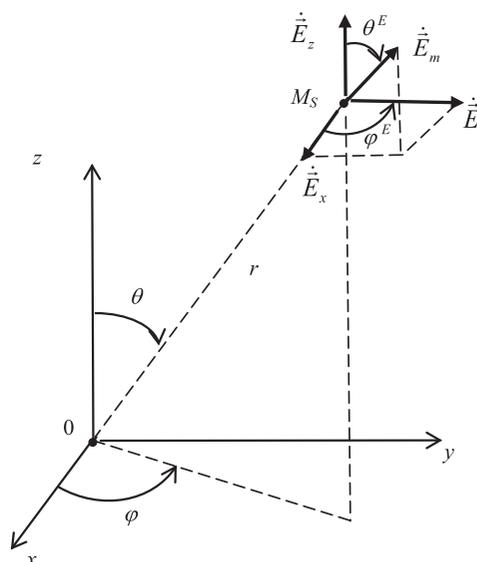


Рис. 1. Пространственная ориентация ОС вектора  $\dot{E}_m$

Геометрию внешней задачи СТА иллюстрирует рис. 1, где показана ориентация ОС комплекс-

ной амплитуды  $\dot{\vec{E}}_m$  в точке наблюдения  $M_S$ , удаленной на расстояние  $r$  от излучателя, размещенного в центре совмещенной системы сферических и декартовых координат.

С точки зрения СТА, главным здесь является вопрос о том, как будут влиять ошибки разного вида на поляризационные свойства поля СА – и что вообще следует понимать под поляризацией в рамках СТА. Для ОС вектора  $E$ -поля имеет место

$$\dot{E}_{x;y;z}^E = E_{x;y;z} \exp(j\psi_{x;y;z}^E), \quad (1)$$

при этом модуль (амплитудное значение вектора  $\dot{\vec{E}}_m$ ) есть

$$E_m = \sqrt{E_x^2 + E_y^2 + E_z^2}; \quad (2)$$

а фазы ОС

$$\psi_{x;y;z}^E = \arctg(\text{Im} \dot{E}_{x;y;z}^E / \text{Re} \dot{E}_{x;y;z}^E). \quad (3)$$

Физический смысл (2) ясен, и вычисление уровней  $E_m$  (аналогично и  $H_m$ ) – как без учета, так и с учетом ошибок, методом статистического имитационного моделирования (СИМ) сложности не вызывает [1-5]. Значения фаз ОС, однако, существенно зависят от способа их определения – что, как уже было сказано, эти сложности создает. Действительно, с одной стороны, разложение вектора  $\dot{\vec{E}}_m$  должно давать  $\psi_{x;y;z}^E = \psi_E$ , с другой стороны, если вычисление  $\psi_E$  реализо-

вать согласно (3), это условие может и не выполняться.

Комплексная амплитуда  $E$ -поля в точке  $M_S$  на рис. 1 представляет собой

$$\begin{aligned} \dot{\vec{E}}_m &= \sum_{n=1}^N \vec{E}_n \exp(j\psi_{rn} + j\psi_{cn}) = \\ &= \sum_{n=1}^N (\vec{x}_0 E_x + \vec{y}_0 E_y + \vec{z}_0 E_z) \exp(j\psi_{rn} + j\psi_{cn}), \end{aligned} \quad (4)$$

где  $\psi_{rn}$  и  $\psi_{cn}$  – фазовые сдвиги, возникающие, соответственно, за счет разности хода волн относительно центра координат и за счет наличия случайных ошибок возбуждения для  $n$ -го элемента  $N$ -элементной СА. Поскольку

$$\begin{aligned} \exp(j\psi_{rn} + j\psi_{cn}) &= \\ &= \cos(\psi_{rn} + \psi_{cn}) + j \sin(\psi_{rn} + \psi_{cn}), \end{aligned} \quad (5)$$

то фаза (4), согласно (3), должна определяться отношением векторных величин, а фазы ОС  $\psi_{x;y;z}^E$  хоть и остаются скалярами, но между собой не равны. Все это означает, во-первых, что пользоваться в рамках СТА понятием фазы, а также методом комплексных амплитуд (даже в условиях ГР) нужно с осторожностью.

Во-вторых, что целесообразно рассмотреть другие – более общие и универсальные – способы исследования и моделирования характеристик трехмерных векторов ЭМП  $\vec{E}_m$  и  $\vec{H}_m$ , отражающие (учитывающие) их поляризационные свойства. Покажем это на примере АСА, работающей в ГР.

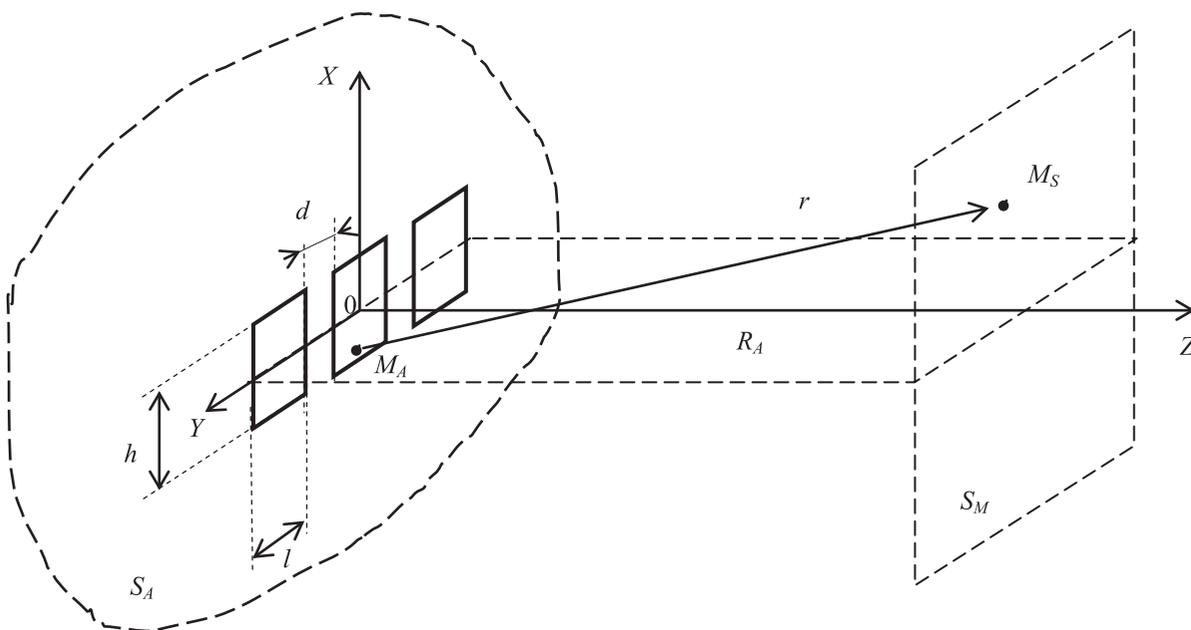


Рис. 2. Расположение трехэлементной АСА в системе прямоугольных координат

$$\begin{aligned}
\operatorname{Re} \dot{E}_{\mathcal{E}r} &= \frac{\dot{E}_A dx dy}{4\pi r^2} \left\{ [\bar{l}_{0M} \bar{r}_0] + 3(\bar{l}_{0\mathcal{E}} \bar{r}_0) \bar{r}_0 - \bar{l}_{0\mathcal{E}} \right\}; \\
\operatorname{Im} \dot{E}_{\mathcal{E}r} &= \frac{\dot{E}_A dx dy}{4\pi V_0} \left\{ \frac{\omega}{r} ([\bar{r}_0 [\bar{r}_0 \bar{l}_{0\mathcal{E}}]] + [\bar{l}_{0M} \bar{r}_0]) - \frac{V_0^2}{\omega r^3} (3(\bar{l}_{0\mathcal{E}} \bar{r}_0) \bar{r}_0 - \bar{l}_{0\mathcal{E}}) \right\}; \quad (6) \\
\operatorname{Re} \dot{H}_{\mathcal{E}r} &= \frac{\dot{E}_A dx dy}{4\pi Z_C r^2} \left\{ [\bar{l}_{0\mathcal{E}} \bar{r}_0] - 3(\bar{l}_{0M} \bar{r}_0) \bar{r}_0 + \bar{l}_{0M} \right\}; \\
\operatorname{Im} \dot{H}_{\mathcal{E}r} &= \frac{\dot{E}_A dx dy}{4\pi V_0 Z_C} \left\{ \frac{\omega}{r} ([\bar{r}_0 [\bar{r}_0 \bar{l}_{0M}]] - [\bar{l}_{0\mathcal{E}} \bar{r}_0]) + \frac{V_0^2}{\omega r^3} (3(\bar{l}_{0M} \bar{r}_0) \bar{r}_0 - \bar{l}_{0M}) \right\}.
\end{aligned}$$

### Моделирование структуры поля АСА

Методика и результаты СИМ структуры поля трехэлементной АСА, которая показана на рис. 2, представлены в [2]. Рассматриваемая АСА расположена на поверхности  $S_A$ , совпадающей с плоскостью  $XOY$  прямоугольной системы координат; размеры одной апертуры  $l \times h$ , расстояние между соседними апертурами (шаг решетки вдоль оси  $y$ ) равняется  $d$ ; расстояние от  $S_A$  до плоскости  $S_M$ , на которой находится точка наблюдения  $M_S$ , равно  $R_A$ ; расстояние от элемента АСА, расположенного в точке  $M_A$  на поверхности  $S_A$ , до точки  $M_S$  есть  $r$ . Элемент АСА представляет собой излучатель Гюйгенса с площадью  $dS = dx \cdot dy$ , в котором виртуальный электрический ток  $i_{\mathcal{E}} = E_A dx / Z_C$  направлен вдоль оси  $y$ ; магнитный ток  $i_M = -E_A dy$  направлен вдоль оси  $x$ ;  $E_A$  – амплитуда напряженности

поля, возбуждающего АСА. Волновое сопротивление в раскрыве АСА предполагается равным сопротивлению окружающей среды  $Z_C$ . Квадратурные составляющие векторов  $\dot{E}_m$  и  $\dot{H}_m$  соответствуют (6); для элемента АСА в центре системы координат на рис. 1 орты  $\bar{l}_{0\mathcal{E}} = \bar{y}_0$ ;  $\bar{l}_{0M} = \bar{x}_0$  (поскольку знак «минус» был учтен при определении магнитного тока); расстоянию  $r$  до точки  $M_S$  соответствует единичный вектор

$$\bar{r}_0 = \bar{x}_0 \cos \varphi \sin \theta + \bar{y}_0 \sin \varphi \sin \theta + \bar{z}_0 \cos \theta.$$

Выполним векторные преобразования в (6) и учтем, что круговая частота  $\omega = 2\pi V_0 / \lambda$ , где  $\lambda$  и  $V_0$  – длина волны и скорость света в свободном пространстве, после чего запишем в окончательном виде для вектора  $\dot{E}_m$ :

$$\begin{aligned}
\operatorname{Re} \dot{E}_x &= \frac{E_A dx dy}{2} \sin \varphi \cos \varphi \sin^2 \theta \left( \frac{3}{2\pi r^2} \right); \\
\operatorname{Im} \dot{E}_x &= \frac{E_A dx dy}{2} \sin \varphi \cos \varphi \sin^2 \theta \left( \frac{1}{\lambda r} - \frac{3\lambda}{4\pi^2 r^3} \right); \\
\operatorname{Re} \dot{E}_y &= \frac{E_A dx dy}{2} (3\sin^2 \varphi \sin^2 \theta - 1 - \cos \theta) \left( \frac{1}{2\pi r^2} \right); \\
\operatorname{Im} \dot{E}_y &= -\frac{\dot{E}_A dx dy}{2} (\cos^2 \varphi \sin^2 \theta + \cos^2 \theta + \cos \theta) \left( \frac{1}{\lambda r} \right) - \\
&\quad - \frac{\dot{E}_A dx dy}{2} (3\sin^2 \varphi \sin^2 \theta - 1) \left( \frac{1}{4\pi^2 r^3} \right); \\
\operatorname{Re} \dot{E}_z &= \frac{\dot{E}_A dx dy}{2} \sin \varphi \sin \theta (3\cos \theta + 1) \left( \frac{1}{2\pi r^2} \right);
\end{aligned} \quad (7)$$

$$\operatorname{Im} \dot{E}_z = \frac{\dot{E}_A dx dy}{2} \sin \varphi \sin \theta (\cos \theta + 1) \left( \frac{1}{\lambda r} \right) - \frac{\dot{E}_A dx dy}{2} \sin \varphi \sin \theta \cos \theta \left( \frac{3\lambda}{4\pi^2 r^3} \right).$$

Аналогичным образом для вектора  $\dot{\vec{H}}_m$ :

$$\begin{aligned} \operatorname{Re} \dot{H}_x &= -\frac{\dot{E}_A dx dy}{2Z_C} (3 \cos^2 \varphi \sin^2 \theta - \cos \theta - 1) \left( \frac{1}{2\pi r^2} \right); \\ \operatorname{Im} \dot{H}_x &= \frac{\dot{E}_A dx dy}{2Z_C} (\sin^2 \varphi \sin^2 \theta + \cos^2 \theta + \cos \theta) \left( \frac{1}{\lambda r} \right) + \frac{\dot{E}_A dx dy}{2Z_C} (3 \cos^2 \varphi \sin^2 \theta - 1) \left( \frac{\lambda}{4\pi^2 r^3} \right); \\ \operatorname{Re} \dot{H}_y &= -\frac{\dot{E}_A dx dy}{2Z_C} \sin \varphi \cos \varphi \sin^2 \theta \left( \frac{3}{2\pi r^2} \right); \\ \operatorname{Im} \dot{H}_y &= -\frac{\dot{E}_A dx dy}{2Z_C} \sin \varphi \cos \varphi \sin^2 \theta \left( \frac{1}{\lambda r} - \frac{3\lambda}{4\pi^2 r^3} \right); \\ \operatorname{Re} \dot{H}_z &= -\frac{\dot{E}_A dx dy}{2Z_C} \cos \varphi \sin \theta (1 + 3 \cos \theta) \left( \frac{1}{2\pi r^2} \right); \\ \operatorname{Im} \dot{H}_z &= -\frac{\dot{E}_A dx dy}{2Z_C} \cos \varphi \sin \theta (1 + \cos \theta) \left( \frac{1}{\lambda r} \right) + \frac{\dot{E}_A dx dy}{2Z_C} \cos \varphi \sin \theta \cos \theta \left( \frac{3\lambda}{4\pi^2 r^3} \right). \end{aligned} \quad (8)$$

Тестирование модели (7)-(8) показывает, что в дальней зоне (при  $2\pi r/\lambda \gg 1$ ) структура поля АСА в направлении оси  $Z$  на рис. 2 (при  $\theta = 0$ ) соответствует плоской волне возбуждения, у которой направление вектора  $\dot{\vec{E}}_m$  задает орт  $-\vec{y}_0$ , а направление вектора  $\dot{\vec{H}}_m$  – орт  $\vec{x}_0$ . Соотношения (7)-(8) позволяют вычислить ОС векторов  $E$ -поля и  $H$ -поля на всех представляющих интерес расстояниях от АСА. Отметим, что в дальней зоне для модулей (7) и (8) имеет место

$$\left| \dot{\vec{E}}_m \right| = E_A dx dy (1 + \cos \theta) / 2\lambda r = \left| \dot{\vec{H}}_m \right| Z_C,$$

что соответствует [6].

### Моделирование поляризации векторов $E$ -поля и $H$ -поля АСА

Для АСА заданной конфигурации модули  $\dot{\vec{E}}_m$  и  $\dot{\vec{H}}_m$  определяются согласно (2) после «покластерного» интегрирования ОС (7)-(8), создаваемых всеми элементами АСА в точке  $M_s$ , с учетом фазовых сдвигов  $\psi_m$  и  $\psi_{cn}$ , которые фигурируют в (4), – по аналогии с [2-4]. Угловые характеристики этих векторов (для вектора  $\dot{\vec{E}}_m$  см. рис. 1) формально определяются как

$$\begin{aligned} \varphi_E &= \operatorname{arctg} (E_y / E_x); \quad \varphi_H = \operatorname{arctg} (H_y / H_x); \\ \theta_E &= \arccos (E_z / \sqrt{E_x^2 + E_y^2 + E_z^2}); \quad (9) \\ \theta_H &= \arccos (H_z / \sqrt{H_x^2 + H_y^2 + H_z^2}). \end{aligned}$$

Чтобы воспользоваться приведенными соотношениями целесообразно «выйти» из метода комплексных амплитуд: поскольку (9), где фигурируют модули ОС, приводит к углам  $\varphi_{E;H} [0; \pi/2]$ ;  $\theta_{E;H} [0; \pi/2]$ , тогда как анализ пространственного положения векторов требует  $\varphi_{E;H} [0; 2\pi]$  и  $\theta_{E;H} [0; \pi]$ . Поэтому представим ОС (1) в действительном виде и «зафиксируем» момент времени  $\omega t = 0$ : при этом в (7)-(8), наряду с модулями ОС

$$\begin{aligned} E_{x;y;z} &= \sqrt{(\operatorname{Re} \dot{E}_{x;y;z})^2 + (\operatorname{Im} \dot{E}_{x;y;z})^2}; \\ H_{x;y;z} &= \sqrt{(\operatorname{Re} \dot{H}_{x;y;z})^2 + (\operatorname{Im} \dot{H}_{x;y;z})^2} \end{aligned}$$

будут фигурировать параметры

$$\begin{aligned} \cos \psi_{x;y;z}^E &= \pm \operatorname{Re} \dot{E}_{x;y;z} / E_{x;y;z}; \\ \cos \psi_{x;y;z}^H &= \pm \operatorname{Re} \dot{H}_{x;y;z} / H_{x;y;z}, \end{aligned}$$

где верхние знаки соответствуют положительным значениям отношений  $\operatorname{Im} \dot{E}_{x;y;z} / \operatorname{Re} \dot{E}_{x;y;z}$  и  $\operatorname{Im} \dot{H}_{x;y;z} / \operatorname{Re} \dot{H}_{x;y;z}$ , а нижние – отрицательным.

Поскольку теперь ОС  $E_{x;y;z}(t)$  могут быть как положительными, так и отрицательными, это позволяет определить согласно (3) и (9) угловые координаты вектора  $E$ -поля во всей области  $\varphi_E [0; 2\pi]$  и  $\theta_E [0; \pi]$  как

$$\begin{aligned} \varphi_E &= \operatorname{arctg} [E_y(t) / E_x(t)] = \\ &= \operatorname{arctg} (\pm \operatorname{Re} \dot{E}_y / \pm \operatorname{Re} \dot{E}_x); \\ \theta_E &= \arccos [E_z(t) / \sqrt{E_x^2 + E_y^2 + E_z^2}] = \\ &= \arccos (\pm \operatorname{Re} \dot{E}_z / \sqrt{E_x^2 + E_y^2 + E_z^2}). \end{aligned} \quad (10)$$

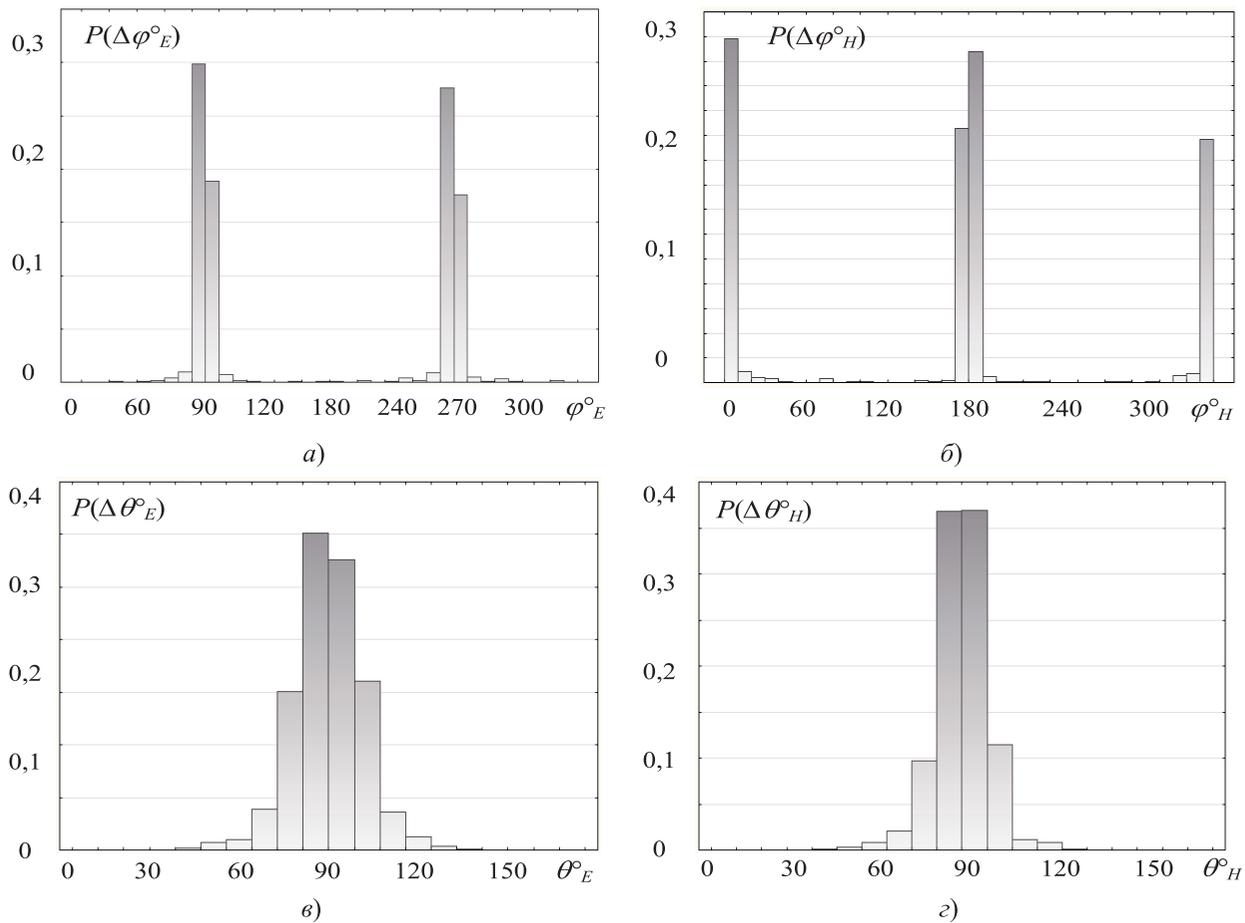


Рис. 3. Гистограммы случайных значений угловых координат векторов поля АСА в точке  $M_S(3; 7; 30)$  на частоте 10 МГц при одном кластере в составе АСА: а)  $\varphi_E$ ; б)  $\varphi_H$ ; в)  $\theta_E$ ; г)  $\theta_H$

Аналогичные формулы имеют место для  $\varphi_H [0; 2\pi]$  и  $\theta_H [0; \pi]$  вектора  $H$ -поля.

В итоге удается исследовать методом СИМ поляризационные свойства поля АСА и отобразить специфику этого процесса следующим образом.

1. На первоначальных этапах проведения СИМ, по аналогии с [2-4], находятся квадратурные составляющие ОС векторов поля АСА в точке  $M_S$  путем интегрирования (7)-(8) по всей ее излучающей поверхности с учетом случайных ошибок разного вида (амплитудных, фазовых и геометрических, поскольку временные ошибки в ГР адекватны фазовым), которые входят в состав  $\text{Re} \dot{E}_{x;y;z}$ ;  $\text{Im} \dot{E}_{x;y;z}$ ;  $\text{Re} \dot{H}_{x;y;z}$  и  $\text{Im} \dot{H}_{x;y;z}$ .

2. По найденным значениям квадратурных составляющих ОС определяются угловые характеристики  $\varphi_{E;H} [0; 2\pi]$  и  $\theta_{E;H} [0; \pi]$  векторов поля АСА по правилам, которые представим на примере вектора  $\vec{E}$ :

- если имеет место  $(\text{Im} \dot{E}_x / \text{Re} \dot{E}_x) > 0$ ,  $(\text{Im} \dot{E}_y / \text{Re} \dot{E}_y) > 0$ , то значение угла  $\varphi_E = \arctg \left| \text{Re} \dot{E}_y / \text{Re} \dot{E}_x \right|$ , так как в первом квадранте плоскости  $хоу$  (см. рис. 1)  $\varphi_E [0; \pi/2]$ ;

- если  $(\text{Im} \dot{E}_x / \text{Re} \dot{E}_x) < 0$ ,  $(\text{Im} \dot{E}_y / \text{Re} \dot{E}_y) > 0$ , то  $\varphi_E = \pi - \arctg \left| \text{Re} \dot{E}_y / \text{Re} \dot{E}_x \right|$ , так как во втором квадранте  $\varphi_E [\pi/2; \pi]$ ;

- если  $(\text{Im} \dot{E}_x / \text{Re} \dot{E}_x) < 0$ ,  $(\text{Im} \dot{E}_y / \text{Re} \dot{E}_y) < 0$ , то  $\varphi_E = \pi + \arctg \left| \text{Re} \dot{E}_y / \text{Re} \dot{E}_x \right|$ , так как в третьем квадранте  $\varphi_E [\pi; 3\pi/2]$ ;

- если  $(\text{Im} \dot{E}_x / \text{Re} \dot{E}_x) > 0$ ,  $(\text{Im} \dot{E}_y / \text{Re} \dot{E}_y) < 0$ , то  $\varphi_E = 2\pi - \arctg \left| \text{Re} \dot{E}_y / \text{Re} \dot{E}_x \right|$ , так как в четвертом квадранте  $\varphi_E [3\pi/2; 2\pi]$ ;

- если имеет место  $\text{Re} \dot{E}_z > 0$ , то

$$\theta_E = \arccos \frac{\text{Re} \dot{E}_z}{\sqrt{(\text{Re} \dot{E}_x)^2 + (\text{Re} \dot{E}_y)^2 + (\text{Re} \dot{E}_z)^2}},$$

так как в верхней полусфере над точкой  $M_S$  на рис. 1 угол  $\theta_E [0; \pi/2]$ ;

- если  $\text{Re} \dot{E}_z < 0$ , то

$$\theta_E = \pi - \arccos \frac{|\text{Re} \dot{E}_z|}{\sqrt{(\text{Re} \dot{E}_x)^2 + (\text{Re} \dot{E}_y)^2 + (\text{Re} \dot{E}_z)^2}},$$

так как в нижней полусфере  $\theta_E [\pi/2; \pi]$ .

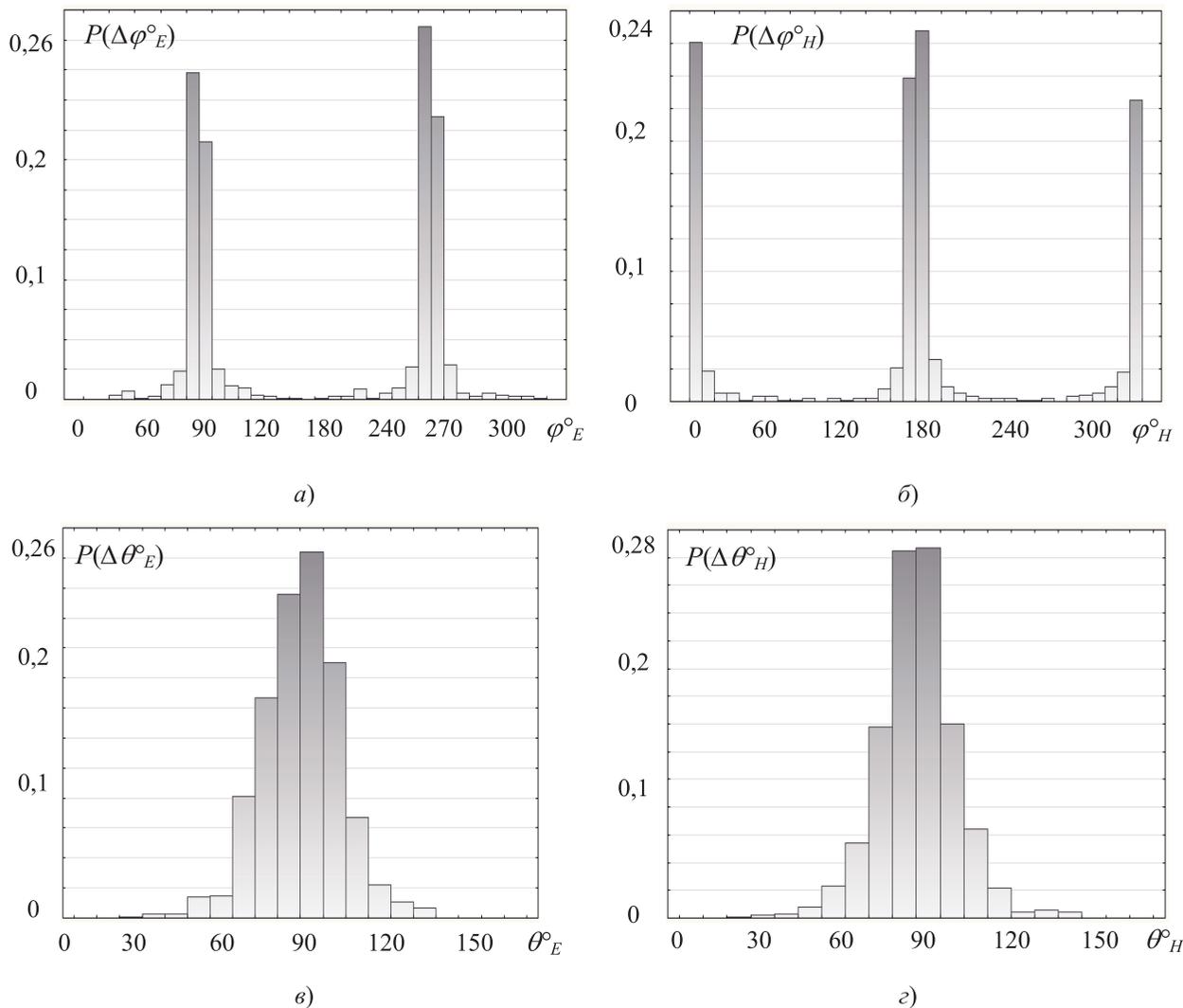


Рис. 4. Гистограммы случайных значений угловых координат векторов поля АСА в точке  $M_S(3; 7; 30)$  на частоте 100 МГц при одном кластере в составе АСА: а)  $\varphi_E$ ; б)  $\varphi_H$ ; в)  $\theta_E$ ; г)  $\theta_H$

Такие же правила справедливы для углов  $\varphi_H$  и  $\theta_H$  вектора  $\vec{H}$ .

3. Включение в схему анализа временно-го аргумента  $\omega t$  позволяет построить динамические модели  $\vec{E}(\omega t)$  и  $\vec{H}(\omega t)$  – в том числе для исследования их поляризационных свойств. Заметим, что динамика случайных значений  $\varphi_{E;H}$  и  $\theta_{E;H}$  иллюстрирует некий новый обобщенный вид поляризации (в рамках СТА будем именовать ее стохастической), которая характеризует поляризационные свойства СА вне зависимости от режима работы и степени неопределенности знаний о нем [7].

### Результаты моделирования

Результаты тестирования и предварительного исследования эффективности (точности и достоверности) разработанной СИМ-модели представим на примере трехэлементной решетки из прямоугольных

АСА с размерами  $l \times h = 1,5 \times 1,8$  м<sup>2</sup>, разделенных промежутками  $d = 0,5$  м на семи частотах: 0,001; 1; 10; 100; 500; 1000 и 5000 МГц. Число «разыгрываний» по технологии Монте-Карло значений случайных ошибок: амплитудных  $\Delta A / A_0$   $[-0,2; 0,2]$ , одинаковых на всех частотах, и фазовых  $\Delta \varphi$  (значения указаны в таблице 1), которое равно числу реализаций углов  $\varphi_{E;H}$ ;  $\theta_{E;H}$ , на каждой частоте составляет  $10^3$ . Число корреляционных кластеров в пределах одной АСА, по аналогии с [2-4], на частотах 500; 1000 и 5000 МГц равно четырем, на других частотах – единице. Точка наблюдения на рис. 2 имеет координаты  $Z = R_A = 30$  м;  $X = 3$  м;  $Y = 7$  м.

В направлении нормали к раскрытию АСА структура ее поля, как уже было сказано, в дальней зоне близка к плоской волне, распространяющейся вдоль оси  $z$ , где вектор  $\vec{E}_m$  с координатами  $\varphi_E = \theta_E = 90^\circ$  ориентирован преимущественно вдоль оси  $y$ , а вектор  $\vec{H}_m$

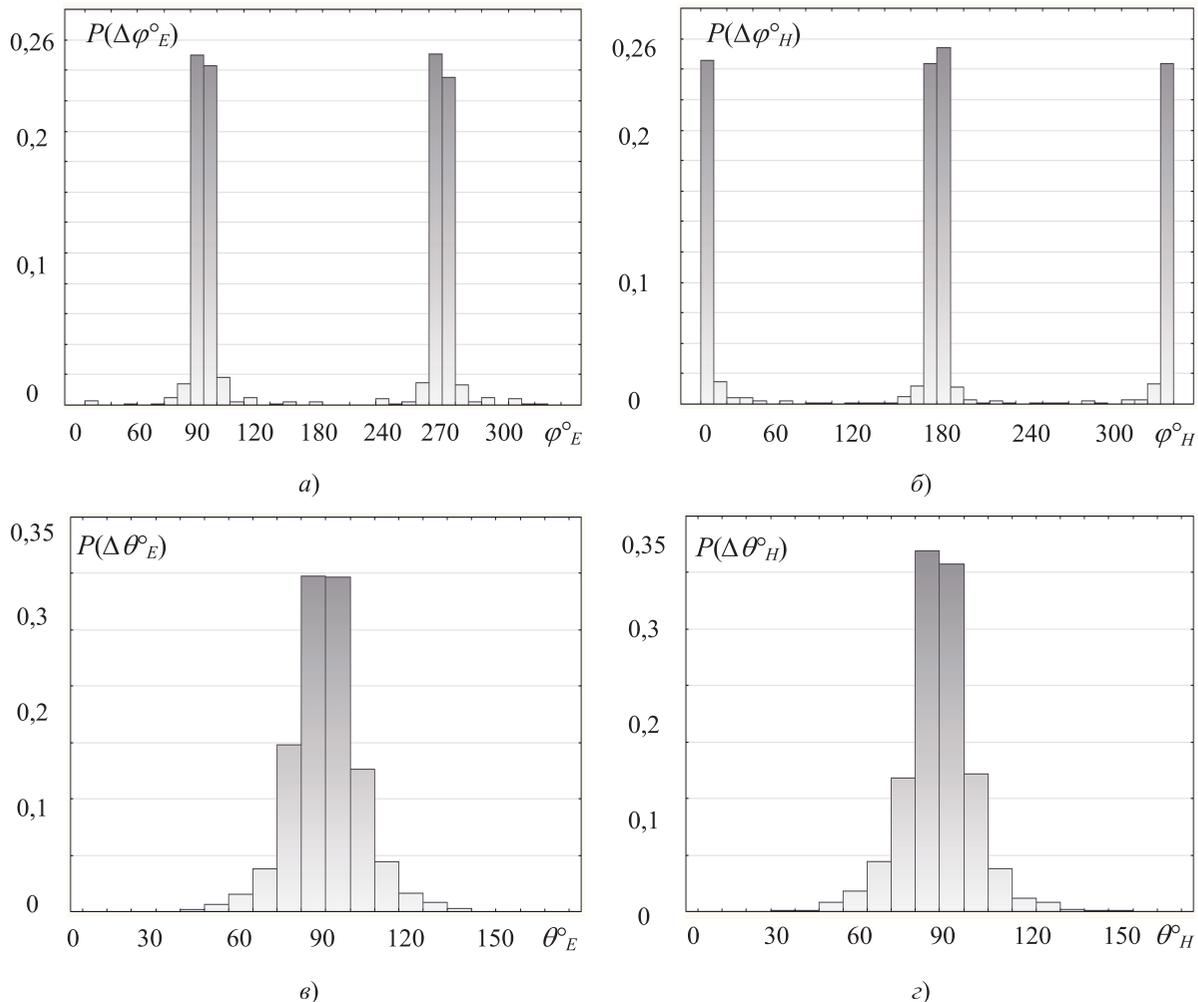


Рис. 5. Гистограммы случайных значений угловых координат векторов поля АСА в точке  $M_S(3; 7; 30)$  на частоте 500 МГц при четырех кластерах в составе АСА: а)  $\varphi_E$ ; б)  $\varphi_H$ ; в)  $\theta_E$ ; г)  $\theta_H$

с координатами  $\varphi_H = 180^\circ$ ;  $\theta_H = 90^\circ$  – преимущественно вдоль оси  $x$ . По мере отклонения точки наблюдения  $M_S$  от оси  $z$  ориентация векторов  $\dot{E}_m$  и  $\dot{H}_m$  будет изменяться, но их поляризация предположительно останется «квазилинейной» – как в отсутствие, так и при наличии амплитудных  $\Delta A / A_0$  и фазовых  $\Delta \varphi$  ошибок. Это объясняется «синхронностью» изменения ОС согласно (7)-(8), где ошибки влияют на уровни  $E_{x; y; z}$ ;  $H_{x; y; z}$ , но не на их взаимные соотношения – которые определяют значения углов  $\varphi_{E;H}$  и  $\theta_{E;H}$ . Рассинхронизировать ОС могут геометрические ошибки (которых в данном случае нет), а также корреляционные связи между кластерами в составе АСА – сказывающиеся по мере увеличения частоты.

Условие дальней зоны  $2\pi r / \lambda \gg 1$  для расстояния  $r = R_A = 30$  м выполняется на частотах выше 16 МГц, а условие ближней зоны  $2\pi r / \lambda \ll 1$  – на частотах ниже 160 кГц. Поэтому указанная близость поля АСА к плоской волне возбуждения будет иметь место на частотах 100; 500; 1000 и 5000 МГц, тогда как

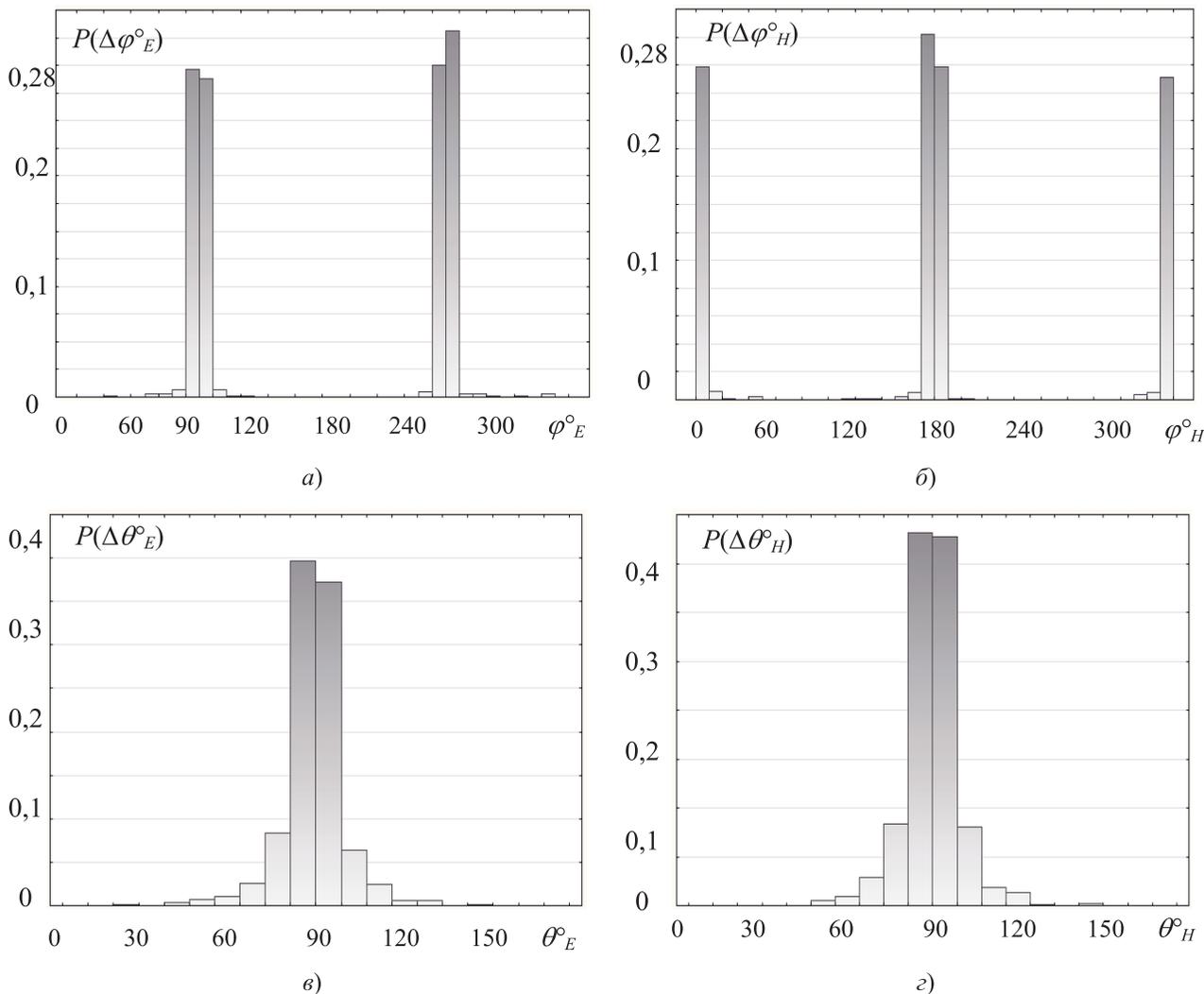
на других частотах структура (7)-(8) будет отличаться от нее – что должно быть видно по результатам СИМ углов  $\varphi_{E;H}$ ;  $\theta_{E;H}$ .

Кроме того, на частотах 0,001 МГц (длина волны  $3 \cdot 10^5$  м) и 1 МГц (300 м) динамика значений  $\varphi_{E;H}$ ;  $\theta_{E;H}$  должно быть незначительной, поскольку АСА с указанными размерами обладает здесь весьма слабой направленностью, на которую наличие ошибок практически не влияет.

На частоте 0,001 МГц (ближняя зона поля АСА) по итогам СИМ значения углов  $\varphi_E = 270^\circ$ ;  $\varphi_H = 180^\circ$ ;  $\theta_E = \theta_H = 90^\circ$  с точностью до погрешности проводимых вычислений. На частоте 1 МГц имеет место разброс углов  $\varphi_E = 269,5^\circ \dots 270^\circ$ ;  $\varphi_H = 180,5^\circ \dots 181^\circ$ ;  $\theta_E = 80,6^\circ \dots 82,2^\circ$ ;  $\theta_H = 93,3^\circ \dots 94,3^\circ$ . На рис. 3-6 приведены гистограммы углов  $\varphi_{E;H}$ ;  $\theta_{E;H}$ , также подтверждающие ожидаемые зависимости и закономерности, что позволяет сделать вывод об успешном тестировании и предварительном применении разработанного программного продукта.

Таблица 1. Фазовые ошибки для векторов  $E$ -поля и  $H$ -поля АСА

$f$ ; МГц	0,001	1	10	100	500	1000	5000
$\Delta\varphi$	$\pm 1^\circ$	$\pm 3^\circ$	$\pm 30^\circ$	$\pm 165^\circ$	$\pm 170^\circ$	$\pm 180^\circ$	$\pm 180^\circ$

Рис. 6. Гистограммы случайных значений угловых координат векторов поля АСА в точке  $M_S(3; 7; 30)$  на частоте 5000 МГц при четырех кластерах в составе АСА: а)  $\varphi_E$ ; б)  $\varphi_H$ ; в)  $\theta_E$ ; г)  $\theta_H$ 

## Выводы

Анализ данных СИМ на частотах 0,001 МГц и 1 МГц показывает, что в ближней зоне поля АСА углы  $\varphi_E = 270^\circ$ ;  $\varphi_H = 180^\circ$ ;  $\theta_E = \theta_H = 90^\circ$  с точностью до погрешности вычислений. С увеличением частоты до 5000 МГц при четырех корреляционных кластерах статистические характеристики углов (см. рис. 3-6) становятся существенно более разнообразными – что соответствует как физическим представлениям об условиях работы и свойствах рассматриваемой АСА, так и предыдущим результатам СИМ [2-4].

Модель возбуждения, традиционная для теории апертурных антенн (рефлекторных, рупор-

ных и т.п.), представляется несостоятельной на уровне ЭГ (9) в достаточно важном для практики случае: при моделировании ЭМП-каналов утечки конфиденциальной информации (КИ) через АСА во внешнюю среду [1]. Считая решетку АСА моделью окон в помещении, из которого происходит утечка КИ, нет оснований утверждать, что она будет возбуждаться поперечной плоской волной – у которой вектор  $E$ -поля имеет только ОС  $\dot{E}_y$ , а вектор  $H$ -поля – только ОС  $\dot{H}_x$ . Скорее напротив: учет реальных условий возбуждения АСА требует применения модели ее базового элемента, в состав которого входят все шесть ОС:  $\dot{E}_{x;y;z}$  и  $\dot{H}_{x;y;z}$ , причем «коммутируемых» в процессе утечки КИ

максимально неопределенным и непредсказуемым – то есть случайным образом. Это обстоятельство не отменяет ни модель (10)-(12), ни методику и результаты СИМ для углов  $\varphi_{E;H}$ ;  $\theta_{E;H}$ , определяющих поляризационные свойства векторов ЭМП АСА. Но замена ЭГ более сложным элементом, состоящим из двух триад ортогональных элементарных излучателей: электрических и магнитных [8], открывает новые перспективы исследования СА методом СИМ в рамках развития СТА.

### Литература

1. Маслов О.Н. Случайные антенны: теория и практика. Самара: Изд-во ПГУТИ-ОФОРТ, 2013. – 480 с. // URL: <http://eisn.psuti.ru/publishing/> (д.о. 30.06.2016)
2. Маслов О.Н., Раков А.С., Силкин А.А. Статистические характеристики поля решетки апертурных случайных антенн // Радиотехника и электроника. Т.58, №11, 2013. – С. 1093-1101.
3. Маслов О.Н., Раков А.С., Силкин А.А. Статистические модели волнового поля апертурной случайной антенны // Радиотехника и электроника. Т.60, №6, 2015. – С. 642-649.
4. Маслов О.Н., Раков А.С. Комплексное моделирование статистических характеристик поля апертурной случайной антенны // Антенны. №2, 2015. – С. 41-49.
5. Maslov O.N., Rakov A.S., Silkin A.A. Statistical Simulation of Random Antennas like Development of the Statistical Theory Antennas // Proceedings of the IX International Conference on Antenna Theory and Techniques ICATT'13. – IEEE Ukraine, 2013, Odessa. – P. 53-58.
6. Кочержевский Г.Н. Антенно-фидерные устройства. М.: Связь, 1972. – 472 с.
7. Маслов О.Н. Онтологические принципы развития статистической теории антенн // Антенны. №4, 2015. – С. 15-25.
8. Маслов О.Н., Раков А.С. Триадный метод анализа и моделирования случайных антенн // Материалы XVI МНТК «Проблемы техники и технологии телекоммуникаций (ПТиТТ-2015)». Уфа: УГАТУ, ноябрь, 2015. – С. 170-172.

*Получено 15.07.2016*

**Аверьянова Анна Николаевна**, аспирант Кафедры экономических и информационных систем (ЭИС) Поволжского государственного университета телекоммуникаций и информатики (ПГУТИ). Тел. (8-846) 228-00-36, 8-927-744-47-02. E-mail: [strizhneva\\_anna@mail.ru](mailto:strizhneva_anna@mail.ru).

**Маслов Олег Николаевич**, д.т.н., профессор, заведующий Кафедрой ЭИС ПГУТИ. Тел. 8-902-371-06-24. E-mail: [maslov@psati.ru](mailto:maslov@psati.ru).

**Раков Александр Сергеевич**, к.т.н., докторант Кафедры ЭИС ПГУТИ. Тел. 8-917-017-34-15. E-mail: [rakov-as@psati.ru](mailto:rakov-as@psati.ru).

## POLARIZATION CHARACTERISTICS OF THREE-APERTURE RANDOM ANTENNA RADIATION

*Averianova A.N., Maslov O.N., Rakov A.S.*

*Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics, Samara, Russian Federation  
E-mail: [maslov@psati.ru](mailto:maslov@psati.ru)*

This work presents results of researches of aperture random antenna (ARA) field intensity polarization characteristics performed by statistical simulation. ARA electromagnetic field structure should be analyzed for inspection the information about channel leakage from office to outer space. The article deals with a lattice consisting of three rectangular ARAs that simulate office windows that make information leakage. We performed researches of described construction electromagnetic field polarization characteristics by statistical simulations. The main results are represented in the form of histograms of azimuthal and meridional angles random values that demonstrate stochastic polarization of ARA field vectors with provided configuration.

**Keywords:** statistical antenna theory, aperture random antennas, electric and magnetic field vectors, stochastic polarization, statistical simulation

**DOI:** 10.18469/ikt.2016.14.3.13

**Averianova Anna Nikolaevna**, Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics, 77 Moskovskoe shosse, Samara 443090, Russian Federation; PhD student of the Department of Economic Information Systems. Tel. +79277444702. E-mail: [strizhneva\\_anna@mail.ru](mailto:strizhneva_anna@mail.ru).

**Maslov Oleg Nikolayevich**, Povolzhsky State University of Telecommunications and Informatics, 77 Moskovskoe shosse, Samara 443090, Russian Federation; the Head of Department of Economic Information Systems, Doctor of Technical Science, Professor. Tel.: +79023710624. E-mail: maslov@psati.ru.

**Rakov Aleksander Sergeevich**, Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics, 77 Moskovskoe shosse, Samara 443090, Russian Federation; doctoral candidate of the Department of Economic Information Systems, PhD in Technical Sciences, Tel.: +79170173415. E-mail: rakov-as@psati.ru.

### References

1. Maslov O.N. *Sluchaynyie anteny: teoriya i praktika* [Random antenna: theory and practice]. Samara. PGUTI-OFORT Publ., 2013. 480 p.
2. Maslov O.N., Rakov A.S., Silkin A.A. Statistical characteristics of the field of an array of random aperture antennas. *Journal of Communications Technology and Electronics*, 2013, vol. 58, no. 11, pp. 1056-1064. doi: 10.1134/S1064226913110107.
3. Maslov O.N., Rakov A.S., Silkin A.A. Statistical models of the wave field of a random aperture antenna. *Journal of Communications Technology and Electronics*, 2015, vol. 60, no. 6, pp. 603-610. doi: 10.1134/S1064226915030146.
4. Maslov O.N., Rakov A.S. Kompleksnoe modelirovanie statisticheskikh harakteristik polja aperturnoj sluchajnoj anteny [Integrated modeling of the statistical characteristics of aperture random antenna field]. *Antenny*, 2015, no. 2, pp. 41-49.
5. Maslov O.N., Rakov A.S., Silkin A.A. Statistical Simulation of Random Antennas like Development of the Statistical Theory Antennas // Proceedings of the IX International Conference on Antenna Theory and Techniques ICATT'13. IEEE Ukraine, Odessa, 2013, pp. 53-58.
6. Kocherzhevskij G.N. *Antenno-fidernye ustrojstva* [Antenna-Feeder Devices]. Moscow, Svyaz Publ., 1972. 472 p.
7. Maslov O.N. Ontologicheskie principy razvitiya statisticheskoy teorii antenn [Ontological principles of statistical antenna theory]. *Antenny*, 2015, no. 4, pp. 15-25.
8. Maslov O.N., Rakov A.S. Triadnyj metod analiza i modelirovaniya sluchajnyh antenn [Triadic method of analysis and simulation of random antennas]. *XVI mezhdunarodnaya nauchno-technicheskaya konferenciya «Problemy tehniki i tehnologii telekommunikacii»*, Ufa, 2015, pp. 170-172.

Received 15.07.2016

## УПРАВЛЕНИЕ И ПОДГОТОВКА КАДРОВ ДЛЯ ОТРАСЛИ ИНФОКОММУНИКАЦИЙ

УДК 378.111

### ИННОВАЦИОННОЕ РАЗВИТИЕ ВУЗА. ИНТЕРСУБЪЕКТИВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ОБУЧЕНИЕМ В ТЕХНИЧЕСКОМ ВУЗЕ

*Моисеева Т.В.*

*Институт проблем управления сложными системами Российской академии наук, Самара, РФ  
Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики, Самара, РФ  
E-mail: mtv-2002@yandex.ru*

Инновационное развитие вуза – предмет пристального интереса российских и зарубежных ученых, политиков, деятелей образования. Изучение проблемы показало необходимость исследования двух направлений: управление вузом как процессом управления социально-экономической системой и управление обучением как процессом взаимодействия преподавателей и студентов. В статье предлагается новый подход к управлению обучением, базирующийся на интересующей теории управления, дополняющий традиционное предметно-ориентированное обучение и ориентированный на поиск выхода из проблемных ситуаций, в которых оказываются будущие инноваторы – студенты технических вузов.