

## Заключение

Полученная методика обработки ЭКС, а также реализующие ее алгоритмы анализа формы зубца Р и анализа ППЖ позволят расширить список диагностируемых заболеваний за счет обнаружения нарушений в проводимости предсердий и повышения уровня достоверности принятия решения о наличии ППЖ. Использование описанных алгоритмов позволит создать современный анализатор аритмий и вовремя предупреждать о возможном появлении серьезных заболеваний, угрожающих жизни пациента.

## Литература

1. Струтынский А.В. Электрокардиограмма: анализ и интерпретация М.: Медпресс-информ, 2002. – 224 с.
2. Simpson M.B. Use of signals in the terminal QRS complex to identify patients with ventricular

tachycardia after myocardial infarction // Circulation. Vol. 64, 1981 – P. 235-242.

3. Сахаров В.Л. Методы и средства анализа медикобиологической информации. Таганрог: Изд. ТРТУ, 2001. – 70 с.
4. Catalano J.T., Guide to ECG Analysis. Lippincott, 2002. – 479 p.
5. <http://physionet.org/challenge/2008/>
6. Иванов Г.Г., Грачева С.В., Сыркина А.Л. Электрокардиография высокого разрешения. М.: Триада-Х, 2003. – 304 с.
7. Седов С.С. Система анализа низкоамплитудных потенциалов сердца на основе статистического алгоритма поиска характерных точек электрокардиосигнала. Дисс. к.т.н. Казань: КГТУ, 1998. – 104 с.
8. Баскаков С.И. Радиотехнические цепи и сигналы. М.: Высшая школа, 2000. – 462 с.

## THE CLASSIFICATION OF P-WAVE AND QRS-COMPLEX ON ELECTROCARDIOSIGNAL WITHIN THE CORRELATION THEORY FOR HEART ARRHYTHMIAS DETECTION

Galimzyanov E.R., Kozlov S.V., Khomyakov A.V., Shcherbakova T.F.

Methods of automated processing for electrical cardiac signal are considered in the article. Ways to expand the list of diseases to be diagnosed by the P-wave shape analysis are proposed, as well as the technique to increase the detection accuracy of heart's ventricular late potentials. Algorithms of QRS-complex classification by its shape based on the estimation of mutual covariance and optimal estimation of the P-wave parameters based on statistical models are described.

**Keywords:** *electrocardiogram automatic analysis, ECG, cardiac arrhythmias, the shape classification, parameters optimal estimation.*

Галимзянов Эмиль Рустэмович, ассистент Кафедры «Радиоэлектронные и телекоммуникационные системы» (РТС) Казанского государственного технического университета им. А.Н. Туполева (КГТУ). Тел. (8-843) 238-99-24. E-mail: [emil\\_kai@bk.ru](mailto:emil_kai@bk.ru)

Козлов Сергей Владимирович, к.т.н., доцент Кафедры РТС КГТУ. Тел. (8-843)238-99-24. E-mail: [skozlov68@yandex.ru](mailto:skozlov68@yandex.ru)

Хомяков Антон Вадимович, ассистент Кафедры РТС КГТУ. Тел. (8-843)238-99-24. E-mail: [kai2016@yandex.ru](mailto:kai2016@yandex.ru)

Щербаклова Татьяна Филипповна, к.т.н., доцент Кафедры РТС КГТУ. Тел. (8-843) 238-99-24. E-mail: [rts@rts.kstu-kai.ru](mailto:rts@rts.kstu-kai.ru)

## ТЕХНОЛОГИИ РАДИОСВЯЗИ, РАДИОВЕЩАНИЯ И ТЕЛЕВИДЕНИЯ

УДК 621.396.677; 621.397.671

### СТАТИСТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОЛЯ АПЕРТУРНОЙ СЛУЧАЙНОЙ АНТЕННЫ

Маслов О.Н., Раков А.С., Силкин А.А.

Статья содержит описание предметной области и исходных данных для статистического имитационного моделирования (СИМ) характеристик поля антенной решетки, которая состоит из трех прямоугольных апертур. Данная антенная решетка возбуждается случайным сигналом и представляет собой апертурную случайную антенну (СА). В статье представлены результаты исследования методом СИМ статистичес-

ких характеристик напряженности поля апертурной СА. Распределения амплитудных и фазовых ошибок предполагаются равномерными в заданных достаточно широких пределах. Методика СИМ основана на применении метода Монте-Карло, эта методика использует разработанную авторами новую процедуру «разыгрывания» случайных ошибок с произвольными законами распределения.

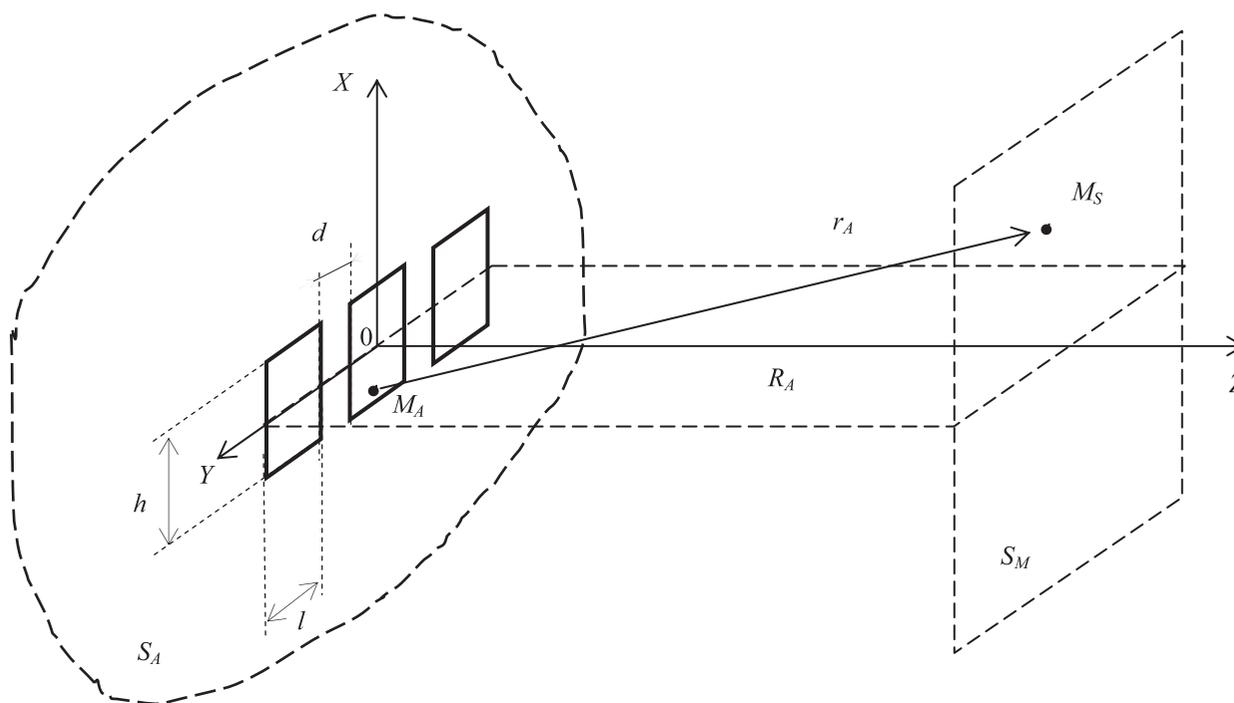


Рис. 1. Расположение трехэлементной апертурной СА в прямоугольной системе глобальных координат

**Ключевые слова:** апертурная случайная антенна, статистические характеристики, метод статистического имитационного моделирования.

**Введение**

Типовые варианты реализации апертурных СА относятся к подклассу антенн со случайной конфигурацией и случайными характеристиками возбуждения, куда входят как одиночные СА, так и антенные решетки со случайным числом и расположением элементов [1-2]. Практическая значимость анализа и моделирования параметров таких СА обусловлена тем, что источники электромагнитного излучения (ЭМИ), связанные с формированием каналов утечки конфиденциальной информации (КИ) – апертурные утечки КИ [3], можно рассматривать как апертурные СА. Примерами апертурных СА являются дефекты герметичных по ЭМИ конструкций (щели, зазоры, поврежденные швы и стыки в экранирующих корпусах и камерах), технологические отверстия, двери и окна в помещениях, подлежащих защите (ПЗП), оборудованных для ведения переговоров, обмена и обработки КИ. С точки зрения статистической теории антенн (СТА) представляют интерес две проблемы: исследование процессов возбуждения апертурных СА исходными КИ-сигналами (имеющими в ряде случаев отличную от ЭМИ физическую природу) и анализ структуры ЭМИ, создаваемых ими во внешней среде, – кото-

рые связаны, соответственно, с внутренней [4-5] и внешней [6-8] задачами электродинамики.

В [2; 4-5; 7-9] показано, что эффективным средством решения указанных задач является метод СИМ, использующий метод Монте-Карло. Возможности СИМ позволяют воспроизводить и анализировать структуру ЭМИ на разных расстояниях от СА и при разных вероятностных моделях случайных отклонений от заданных детерминированных значений пространственных координат, амплитуд, фаз и временных сдвигов сигналов, возбуждающих элементы СА (геометрических, амплитудных, фазовых и временных ошибок), что является традиционным содержанием СТА. Из новых задач можно отметить исследование стохастических поляризационных эффектов в СА разной конструкции; анализ и моделирование энергетического потенциала конкретных СА; построение вероятностных моделей сигналов, создаваемых СА, с целью сопоставления их с законами Релея, Райса и другими известными распределениями, а также с моделями, полученными в условиях применимости обобщенной центральной предельной теоремы теории вероятностей на основе семейства одномерных устойчивых законов [10-11].

Цель статьи – описание предметной области и определение исходных данных для проведения СИМ в рамках построения вербальной модели апертурной СА, а также анализ результатов СИМ

применительно к возбуждаемой случайным КИ-сигналом СА, состоящей из трех прямоугольных апертур, которая моделирует поверхность стены ПЗП с окнами, ориентированными в направлении возможного перехвата КИ.

### Вербальная и математическая модели СА. Исходные данные для проведения СИМ

Геометрию решаемой задач иллюстрирует рис. 1. Трехэлементная апертурная СА расположена на поверхности  $S_A$ , совпадающей с внешней стеной ПЗП и плоскостью  $XOY$  прямоугольной системы глобальных координат; размеры одной прямоугольной апертуры  $l \times h$ , расстояние между соседними апертурами (шаг решетки вдоль оси  $y$ ) равняется  $d$ ; расстояние от  $S_A$  до плоскости  $S_M$ , в которой определяется структура ЭМИ, равно  $R_A$ ; расстояние от элемента СА, расположенного в точке  $M_A$  на поверхности  $S_A$ , до точки наблюдения  $M_S$  на плоскости  $S_M$  есть  $r_A$ .

Будем считать, во-первых, что источник КИ-сигнала, расположенный слева от  $S_A$  в глубине ПЗП, создает на раскрыве СА сложное по структуре (неравномерное, несинфазное, стохастическое и т.п.) возбуждающее поле  $\vec{E}_0$  с круговой частотой  $\omega_k$ , соответствующей  $k$ -ой гармонике его частотного спектра. Во-вторых, что возбуждающее СА поле можно представить в виде суперпозиции регулярной (квазидетерминированной) и нерегулярной (случайной) составляющих, как это принято в СТА. На регулярное поле, равномерное (или квазиравномерное) в пространстве по амплитуде и фазе, накладывается нерегулярная составляющая в виде совокупности амплитудных и фазовых случайных «ошибок» (далее без кавычек), представляющих собой случайные отклонения от равномерных распределений амплитуд и фаз.

В-третьих, если расположение и режим работы источника КИ, влияние конфигурации и инфраструктуры ПЗП, а также другие случайные факторы, воздействующие на СА, при постановке и решении внутренней задачи приемлемым (достаточно определенным и достоверным) образом описать не удастся, взаимно независимые (или коррелированные) значения ошибок в рамках метода СИМ допустимо «разыгрывать» с помощью метода Монте-Карло для заданного априори вероятностного закона (равномерного, нормального, устойчивого и т.п.). При этом отметим, что возможности СИМ позволяют достаточно просто оценивать степень робастности вариантов решения внешней задачи и исследовать

влияние кумулятивности исходных данных на точность и достоверность получаемых результатов – что представляется одним из важных достоинств данного метода [2; 4-5; 7-8]. Исходные данные для проведения СИМ могут быть конкретизированы и уточнены экспериментальным путем на моделях и в реальных ПЗП, а в тестовых случаях – при помощи упрощенных расчетных соотношений.

При переходе от вербальной к математической модели апертурной СА будем считать, что элемент СА, расположенный в точке  $M_A$ , представляет собой излучатель Гюйгенса  $dS = dx \cdot dy$ , в котором виртуальный электрический ток  $i_\zeta = E_0 dx / Z_0$ ; магнитный ток  $i_M = -E_0 dy$ , и для гармонического режима работы излучателя комплексная амплитуда его напряженности поля в локальной системе совмещенных прямоугольных  $x; y; z$  и сферических  $r; \theta; \varphi$  координат (см. рис. 2) представляет собой [8]

$$\begin{aligned} d\dot{E}_\theta &= \frac{E_0 dx dy}{2\lambda r_A} \sin \varphi (1 + \cos \theta) e^{-ikr_A}; \\ d\dot{E}_\varphi &= \frac{E_0 dx dy}{2\lambda r_A} \cos \varphi (1 + \cos \theta) e^{-ikr_A}, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $\lambda = 2\pi V_0 / \omega_k$  – длина волны, соответствующая гармонике  $\omega_k$ ;  $V_0$  и  $Z_0$  – соответственно, волновое сопротивление и скорость света в окружающей среде;  $x; y; z$  – прямоугольные глобальные координаты точки  $M_A$  на плоскости  $S_A$ ;  $x_m; y_m; z_m$  – прямоугольные глобальные координаты точки  $M_S$  на плоскости  $S_M$ ; другие обозначения соответствуют рис. 1-2.

Отметим, что в (1) учтено предполагаемое равенство значений волнового сопротивления среды в апертуре СА и внешнем пространстве, а также что расстояние  $r_A = \sqrt{(x_m - x)^2 + (y_m - y)^2 + (z_m - z)^2}$  здесь соответствует условию  $kr_A \gg 1$  для дальней (волновой) зоны Фраунгофера, где  $k = 2\pi / \lambda$  – волновое число, а размеры каждого излучателя  $\Delta x \approx dx$  и  $\Delta y \approx dy$  должны соответствовать  $k\Delta x \ll 1$ ;  $k\Delta y \ll 1$ , и это необходимо будет учитывать при разбиении апертуры СА на элементы с учетом текущих значений  $r_A$  и  $\lambda$ .

Выполним преобразование локальных сферических и прямоугольных координат  $\sin \varphi = \frac{y}{\sqrt{x^2 + y^2}}$ ;  $\cos \varphi = \frac{x}{\sqrt{x^2 + y^2}}$  и преобразование при переходе от локальных прямоугольных координат к глобальным координатам:

$$\begin{aligned} \sin \varphi &= \frac{y_m - y}{\sqrt{(x_m - x)^2 + (y_m - y)^2}}; \\ \cos \varphi &= \frac{x_m - x}{\sqrt{(x_m - x)^2 + (y_m - y)^2}}; \end{aligned}$$

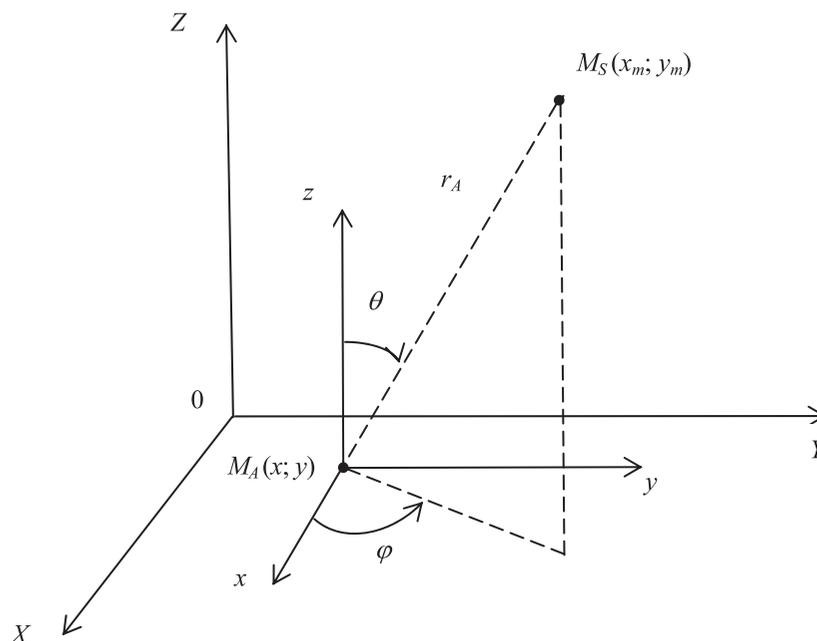


Рис. 2. Расположение излучателя Гюйгенса  $dS = dx \cdot dy$  в точке  $M_A(x; y)$  на плоскости  $S_A$  в совмещенной системе прямоугольных и сферических глобальных и локальных координат

$$\cos \theta = \frac{z_m - z}{r_A},$$

после чего получим (1) как

$$\begin{aligned} d\dot{E}_{\theta m} &= \frac{E_0 dx dy}{2\lambda r_A} \left(1 + \frac{z_m - z}{r_A}\right) \times \\ &\times \frac{y_m - y}{\sqrt{(x_m - x)^2 + (y_m - y)^2}} e^{-ik r_A}; \\ d\dot{E}_{\varphi m} &= \frac{E_0 dx dy}{2\lambda r_A} \left(1 + \frac{z_m - z}{r_A}\right) \times \\ &\times \frac{x_m - x}{\sqrt{(x_m - x)^2 + (y_m - y)^2}} e^{-ik r_A}. \end{aligned} \quad (2)$$

Представим (2) в тригонометрической форме

$$\begin{aligned} d\dot{E}_{\theta m} &= \frac{E_0 dx dy}{2\lambda r_A} \left(1 + \frac{z_m - z}{r_A}\right) \frac{y_m - y}{\sqrt{(x_m - x)^2 + (y_m - y)^2}} \times \\ &\times [\cos(kr_A) - i \sin(kr_A)]; \\ d\dot{E}_{\varphi m} &= \frac{E_0 dx dy}{2\lambda r_A} \left(1 + \frac{z_m - z}{r_A}\right) \frac{x_m - x}{\sqrt{(x_m - x)^2 + (y_m - y)^2}} \times \\ &\times [\cos(kr_A) - i \sin(kr_A)] \end{aligned} \quad (3)$$

и разложим составляющие и по базису глобальной системы прямоугольных координат, чтобы рассчитать суперпозицию полей от совокупности произвольно расположенных излучателей  $M_A(x;$

$y)$ . Ориентацию указанных составляющих вектора  $\vec{E}_m$  в точке наблюдения  $M_S(x_m; y_m)$  для излучателя, размещенного в центре координат, иллюстрирует рис. 3 – где ортогональные составляющие в прямоугольных координатах условно показаны в точке  $M_A$ .

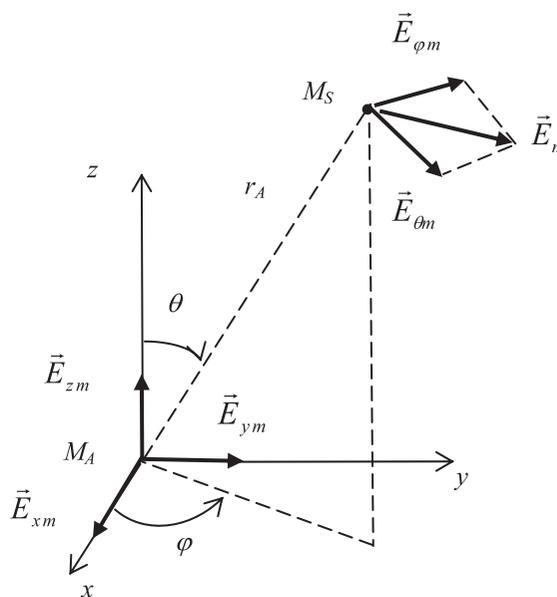


Рис. 3. Пространственная ориентация составляющих вектора  $\vec{E}_m$

Правильность последующих преобразований контролируется по двум условиям: во-первых, ортогональные составляющие  $\vec{E}_m$  в точке наблюдения для глобальной и локаль-

ной систем прямоугольных координат должны быть равны между собой, так как орты у этих систем параллельны друг другу; во-вторых, модуль вектора  $\vec{E}_m$  должен быть одинаковым в любой системе координат. Поскольку

$$\begin{aligned} d\vec{E}_{\theta m} &= (\vec{x}_0 \cos \varphi \cos \theta + \vec{y}_0 \sin \varphi \cos \theta - \\ &\quad - \vec{z}_0 \sin \theta) dE_{\theta m}; \\ d\vec{E}_{\varphi m} &= (-\vec{x}_0 \sin \varphi + \vec{y}_0 \cos \varphi) dE_{\varphi m}, \end{aligned} \quad (4)$$

получаем в комплексной форме

$$\begin{aligned} d\dot{E}_{xm} &= d\dot{E}_{\theta m} \cos \varphi \cos \theta - d\dot{E}_{\varphi m} \sin \varphi; \\ d\dot{E}_{ym} &= d\dot{E}_{\theta m} \sin \varphi \cos \theta + d\dot{E}_{\varphi m} \cos \varphi; \quad (5) \\ d\dot{E}_{zm} &= -d\dot{E}_{\theta m} \sin \theta, \end{aligned}$$

и в итоге

$$\begin{aligned} d\dot{E}_{xm} &= dE_{m0} (\cos \theta - 1) \sin \varphi \cos \varphi \times \\ &\quad \times [\cos(kr_A) - i \sin(kr_A)]; \\ d\dot{E}_{ym} &= dE_{m0} (\sin^2 \varphi \cos \theta + \cos^2 \varphi) \times \\ &\quad \times [\cos(kr_A) - i \sin(kr_A)]; \end{aligned} \quad (6)$$

$$d\dot{E}_{zm} = -dE_{m0} \sin \varphi \sin \theta [\cos(kr_A) - i \sin(kr_A)],$$

где  $dE_{m0} = \frac{E_0 dx dy}{2\lambda r_A} (1 + \cos \theta)$ . Модуль ком-

плексной амплитуды вектора, соответствующего правой части (6), равняется  $dE_{m0}$ , поэтому второе условие здесь выполняется. Выделив в (6) действительные и мнимые части, можно интегрировать их по апертуре СА путем численного суммирования, поскольку орты  $\vec{x}_0; \vec{y}_0; \vec{z}_0$  у глобальной и локальной систем прямоугольных координат одинаковы и не меняют свою ориентацию при перемещении точки наблюдения  $M_S$  в окружающем пространстве – то есть первое условие при этом выполняется автоматически.

Результатом интегрирования (6) по всем трем прямоугольным апертурам, входящим в состав СА (см. рис. 1), являются действительные и мнимые части составляющих напряженности поля  $E_x; E_y; E_z$ . Модуль напряженности поля при этом есть

$$\begin{aligned} |\dot{E}| &= [(\operatorname{Re} \dot{E}_x)^2 + (\operatorname{Im} \dot{E}_x)^2 + (\operatorname{Re} \dot{E}_y)^2 + \\ &\quad + (\operatorname{Im} \dot{E}_y)^2 + (\operatorname{Re} \dot{E}_z)^2 + (\operatorname{Im} \dot{E}_z)^2]^{1/2}. \end{aligned} \quad (7)$$

## Метод моделирования коррелированных ошибок в апертуре СА

Амплитудные и фазовые ошибки вводятся в (5)-(6) принятым в СТА и оговоренным выше способом:

$$\dot{E}_{m0} = E_0 (1 + a_E) \exp(-j\varphi_E), \quad (8)$$

где  $a_E = \Delta E / E_0$ ;  $\Delta E$  – амплитудная ошибка;  $\varphi_E$  – фазовая ошибка. Тогда (6) в прежних обозначениях будет иметь вид

$$\begin{aligned} d\dot{E}_{xm} &= dE_{m0} (1 + a_E) (\cos \theta - 1) \sin \varphi \cos \varphi \times \\ &\quad \times [\cos(kr_A + \varphi_E) - i \sin(kr_A + \varphi_E)]; \\ d\dot{E}_{ym} &= dE_{m0} (1 + a_E) (\sin^2 \varphi \cos \theta + \cos^2 \varphi) \times \\ &\quad \times [\cos(kr_A + \varphi_E) - i \sin(kr_A + \varphi_E)]; \quad (9) \\ d\dot{E}_{zm} &= -dE_{m0} (1 + a_E) \sin \varphi \sin \theta \times \\ &\quad \times [\cos(kr_A + \varphi_E) - i \sin(kr_A + \varphi_E)]. \end{aligned}$$

Значения ошибок  $a_E$  и  $\varphi_E$ , которые фигурируют в (9), в рамках метода СИМ необходимо «разыгрывать» методом Монте-Карло для заданных законов распределения этих ошибок [4-5] и с учетом их возможной корреляционной зависимости друг от друга. Схема моделирования при этом такова: амплитудные  $a_E$  и фазовые  $\varphi_E$  ошибки можно считать взаимно независимыми [7], однако их собственными пространственными связями пренебрегать нельзя. В то же время разыгрывать независимые значения ошибок, а затем производить их преобразование в последовательности коррелированных ошибок по аналогии с [9] тоже нельзя – поскольку в данном случае матрица преобразования, с учетом множества элементов Гюйгенса, используемых в расчетах, оказывается неприемлемо большой.

Поэтому вместо общепринятых в СТА моделей коэффициента пространственной корреляции вида  $R_{nm} = \exp[-(r_n - r_m)^2 / R_0^2]$  и  $R_{nm} = \exp(-|r_n - r_m| / R_0)$ , где  $R_0$  – радиус корреляции ошибок для элементов СА с координатами  $r_n$  и  $r_m$ , было предложено ввести эффективный кластерный коэффициент корреляции  $R_{\mathcal{C}}$ , который способен принимать два дискретных значения:  $R_{\mathcal{C}} = 1$  в пределах каждого кластера в апертуре СА и  $R_{\mathcal{C}} = 0$  за пределами данного кластера. Другими словами, значения однотипных ошибок предполагаются постоянными:  $a_E = \text{const}$  и  $\varphi_E = \text{const}$  в пределах каждого кластера, а от кластера к

кластеру изменяются случайным и независимым друг от друга образом. Поскольку в данном случае геометрические размеры (определяющие площадь) прямоугольного кластера выполняют роль радиуса пространственной корреляции  $R_0$ , усилению связи между однотипными ошибками (росту  $R_0$ ) соответствует уменьшение числа кластеров  $N_K$  в составе апертурной СА, а ослаблению корреляционной связи (уменьшению  $R_0$ ), напротив – увеличение числа кластеров  $N_K$ .

Предложенная модель ориентирована специально на исследование апертурной СА с применением метода СИМ и в какой-либо дополнительной адаптации – в отличие, например, от [9], не нуждается. При тестировании СИМ-модели можно исходить из того, во-первых, что в обоих предельных случаях: при  $N_K = 1$  (что эквивалентно  $R_0 \gg L_m$ , где  $L_m$  – максимальный линейный размер СА) и при  $N_K \gg 1$  (что эквивалентно  $L_m \gg R_0$ ) влияние ошибок на уровни напряженности поля СА является минимальным, поэтому распределения  $E(S_M)$  или  $E^2(S_M)$  на плоскости  $S_M$  (см. рис. 1) при наличии и отсутствии ошибок будут отличаться друг от друга на величину погрешности проводимого компьютерного (численного и имитационного) эксперимента. Во-вторых, что между предельными значениями  $N_K = 1$  и  $N_K \gg 1$  должен быть (или может быть) вариант, соответствующий максимальному влиянию коррелированных ошибок  $a_E$  и  $\varphi_E$  на функцию указанных распределений напряженности поля СА.

Для проверки обоих утверждений методом СИМ были исследованы реализации распределения  $E^2(S_M)$  для семи моделей пространственной корреляционной связи между ошибками в трехэлементной апертурной СА:

1) при отсутствии кластеров, когда в СА все  $a_E = const$  и  $\varphi_E = const$ , то есть ошибки на форму  $E^2(S_M)$  не влияют;

2) при  $N_K = 1$ , когда в пределах каждой из трех апертур в составе СА (см. рис. 1) значения  $a_E = const$  и  $\varphi_E = const$ , но при переходе от апертуры к апертуре ошибки изменяются независимо друг от друга образом;

3) при  $N_K = 4$ , когда в пределах 1/4 площади каждой из трех апертур в составе СА значения  $a_E = const$  и  $\varphi_E = const$ , но при переходе от одной части апертуры к другой и от апертуры к апертуре ошибки изменяются случайным и независимым друг от друга образом;

4) при  $N_K = 16$ , когда вышесказанное относится к 1/16 площади каждой из трех апертур в составе СА;

5) при  $N_K = 64$ , когда вышесказанное относится к 1/64 площади каждой из трех апертур в составе СА;

6) при  $N_K = 256$ , когда вышесказанное относится к 1/256 площади каждой из трех апертур в составе СА;

7) при  $N_K = N_G$ , где  $N_G \gg 1$  – число элементов Гюйгенса в составе СА.

По результатам СИМ был сделан вывод о том, что наихудшим случаем, с точки зрения влияния на неискаженную ошибками функцию  $E^2(S_M)$ , является вариант  $N_K = 1$  – отсюда следует, что разыгрывать независимые ошибки с помощью метода Монте-Карло [4-5] достаточно лишь при переходе от одной апертуры в составе трехэлементной СА к другой. Отметим также, что предлагаемый способ учета влияния корреляционных связей между ошибками в апертуре является достаточно гибким и универсальным в том смысле, что позволяет исследовать свойства СА вне зависимости от режима ее работы (гармонический, шумовой, импульсный и т.д. [7]).

### Комплексное тестирование программы расчета характеристик апертурной СА

Тестирование проводилось в четыре этапа: на первом этапе качественно проверялись косвенные признаки правильности работы детерминированной части программы: по характеру пространственно-углового распределения (динамика уровней, симметричность относительно оси  $Z$  на рис. 1 и т.п.) действительных и мнимых частей составляющих  $\dot{E}_x$ ;  $\dot{E}_y$  и  $\dot{E}_z$  в пределах плоскости  $S_M$  с размерами  $20 \times 20 \text{ м}^2$  для трехэлементной решетки синфазно возбужденных апертурных СА (подробнее см. далее) в отсутствие амплитудных и фазовых ошибок. На втором этапе рассчитанные уровни  $\dot{E}_x$ ;  $\dot{E}_y$  и  $\dot{E}_z$  в волновой зоне Фраунгофера для уединенной прямоугольной апертуры на расстояниях  $R \geq 2L^2/\lambda$ , где  $L$  – максимальный размер апертуры;  $\lambda$  – длина волны, сопоставлялись с аналитическим результатом  $E_0$  для прямоугольной синфазной излучающей поверхности [6].

Критерием количественной оценки при этом была относительная погрешность  $\delta_E = (|\dot{E}| - E_0) / E_0$ , где  $|\dot{E}|$  соответствует (7) с учетом  $\dot{E}_y \gg \dot{E}_z$  и  $\dot{E}_x = 0$ . На третьем этапе, по аналогии с [4-5], контролировались процедуры «разыгрывания» методом Монте-Карло слу-

Таблица 1. Результаты тестирования программы определения  $\text{Re}(\dot{E}_{y;z}); \text{Im}(\dot{E}_{y;z})$  на частоте 1 МГц

Точка на $S_M$	-10	-5	0	5	10
$\text{Re}(\dot{E}_y)$	$6,20839 \cdot 10^{-4}$	$6,96274 \cdot 10^{-4}$	$7,24619 \cdot 10^{-5}$	$6,96274 \cdot 10^{-4}$	$6,20839 \cdot 10^{-4}$
$\text{Im}(\dot{E}_y)$	$-4,84577 \cdot 10^{-4}$	$-5,16098 \cdot 10^{-4}$	$-5,27626 \cdot 10^{-4}$	$-5,16098 \cdot 10^{-4}$	$-4,84577 \cdot 10^{-4}$
$\text{Re}(\dot{E}_z)$	$2,0519 \cdot 10^{-4}$	$1,14995 \cdot 10^{-4}$	$-1,86194 \cdot 10^{-19}$	$-1,14995 \cdot 10^{-4}$	$-2,0519 \cdot 10^{-4}$
$\text{Im}(\dot{E}_z)$	$-1,6077 \cdot 10^{-4}$	$-8,55825 \cdot 10^{-5}$	$-1,35104 \cdot 10^{-19}$	$8,55825 \cdot 10^{-5}$	$1,6077 \cdot 10^{-4}$

Таблица 2. Результаты тестирования программы определения  $\text{Re}(\dot{E}_{y;z}); \text{Im}(\dot{E}_{y;z})$  на частоте 100 МГц

Точка на $S_M$	-10	-5	0	5	10
$\text{Re}(\dot{E}_y)$	$-3,706 \cdot 10^{-2}$	$4,258 \cdot 10^{-2}$	$8,880 \cdot 10^{-2}$	$4,258 \cdot 10^{-2}$	$-3,706 \cdot 10^{-2}$
$\text{Im}(\dot{E}_y)$	$8,497 \cdot 10^{-3}$	$-5,888 \cdot 10^{-2}$	$-9,673 \cdot 10^{-3}$	$-5,888 \cdot 10^{-2}$	$8,497 \cdot 10^{-3}$
$\text{Re}(\dot{E}_z)$	$-1,100 \cdot 10^{-2}$	$4,853 \cdot 10^{-3}$	$1,004 \cdot 10^{-14}$	$-4,853 \cdot 10^{-3}$	$1,100 \cdot 10^{-2}$
$\text{Im}(\dot{E}_z)$	$5,959 \cdot 10^{-3}$	$-1,105 \cdot 10^{-2}$	$-3,188 \cdot 10^{-15}$	$1,105 \cdot 10^{-2}$	$-5,959 \cdot 10^{-3}$

Таблица 3. Результаты тестирования программы определения  $\text{Re}(\dot{E}_{y;z}); \text{Im}(\dot{E}_{y;z})$  на частоте 0,5 ГГц

Точка на $S_M$	-10	-5	0	5	10
$\text{Re}(\dot{E}_y)$	$-4,65857 \cdot 10^{-3}$	$-8,81731 \cdot 10^{-2}$	0,352541	$-8,81731 \cdot 10^{-2}$	$-4,65857 \cdot 10^{-3}$
$\text{Im}(\dot{E}_y)$	0,101535	$-9,25303 \cdot 10^{-2}$	-0,210944	$-9,25303 \cdot 10^{-2}$	0,101535
$\text{Re}(\dot{E}_z)$	$2,34612 \cdot 10^{-3}$	$-1,78865 \cdot 10^{-2}$	$-6,61333 \cdot 10^{-18}$	$1,78865 \cdot 10^{-2}$	$-2,34612 \cdot 10^{-3}$
$\text{Im}(\dot{E}_z)$	$2,97967 \cdot 10^{-2}$	$-9,30067 \cdot 10^{-3}$	$1,11519 \cdot 10^{-16}$	$9,30067 \cdot 10^{-3}$	$-2,97967 \cdot 10^{-2}$

Таблица 4. Результаты тестирования программы определения  $\text{Re}(\dot{E}_{y;z}); \text{Im}(\dot{E}_{y;z})$  на частоте 1 ГГц

Точка на $S_M$	-10	-5	0	5	10
$\text{Re}(\dot{E}_y)$	0,104	-0,233	0,309	-0,233	0,104
$\text{Im}(\dot{E}_y)$	$-1,601 \cdot 10^{-2}$	$-5,442 \cdot 10^{-2}$	-0,539	$-5,442 \cdot 10^{-2}$	$-1,601 \cdot 10^{-2}$
$\text{Re}(\dot{E}_z)$	$3,063 \cdot 10^{-2}$	$-2,606 \cdot 10^{-2}$	$-1,305 \cdot 10^{-13}$	$2,606 \cdot 10^{-2}$	$-3,063 \cdot 10^{-2}$
$\text{Im}(\dot{E}_z)$	$-5,459 \cdot 10^{-3}$	$-7,015 \cdot 10^{-3}$	$-2,665 \cdot 10^{-14}$	$7,015 \cdot 10^{-3}$	$5,459 \cdot 10^{-3}$

чайных значений  $a_E$  и  $\varphi_E$ , фигурирующих в (9), для заданных законов распределения этих ошибок и с учетом их корреляционной зависимости (или независимости) друг от друга. На четвертом этапе определялись уровни  $\dot{E}_x; \dot{E}_y$  и  $\dot{E}_z$  при полностью коррелированных ошибках (для  $N_K = 1$ ) и при отсутствии ошибок  $a_E; \varphi_E$  в рассматриваемой трехэлементной СА – в соответствии с

высказанным предложением использовать меру различия между ними для оценки погрешности проводимого компьютерного (численного и имитационного) эксперимента.

Результат тестирования иллюстрирует таблицы 1-3, где в качестве примера представлены значения  $\text{Re}(\dot{E}_{y;z})$  и  $\text{Im}(\dot{E}_{y;z})$  для рассматриваемой трехэлементной апертурной СА на частотах 1 МГц; 10 МГц;

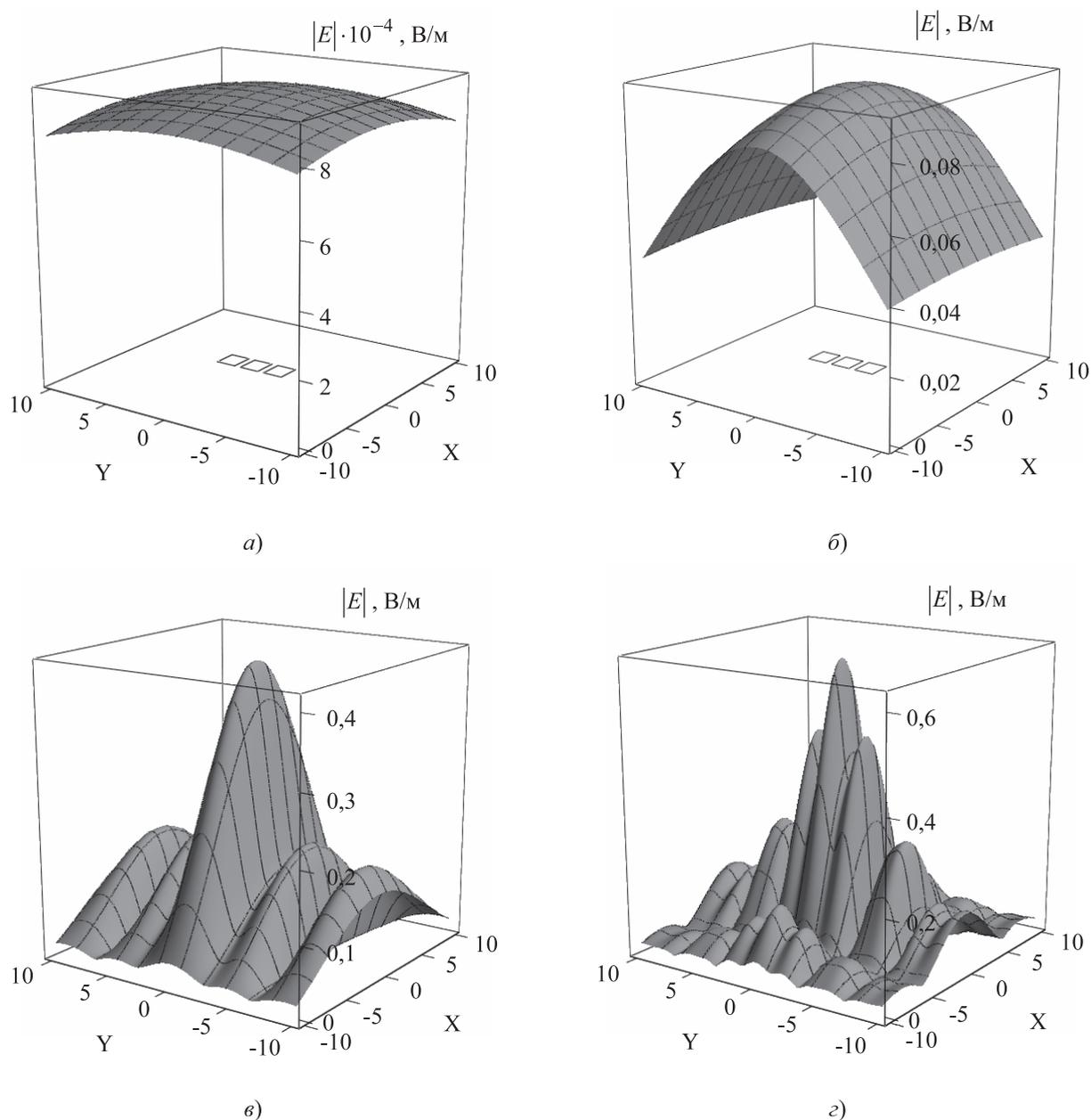


Рис. 4. Распределения модуля  $|E|$  в пределах плоскости  $S_M$  с размерами  $20 \times 20 \text{ м}^2$  для трехэлементной решетки апертурных СА при отсутствии амплитудных и фазовых ошибок:

а) частота 1 МГц; б) 100 МГц; в) 0,5 ГГц; з) 1 ГГц.

0,5 ГГц и 1 ГГц соответственно, полученные двумя указанными способами в пяти точках на плоскости  $S_M$  с координатами  $Z = R_A = 30 \text{ м}$ ;  $Y = 0; \pm 5 \text{ м}; \pm 10 \text{ м}$  (см. рис. 1), которые оказались совпадающими между собой до всех указанных цифр. Приведенные в таблицах 1-3, а также полученные на предыдущих этапах данные позволяют считать итоги тестирования вполне удовлетворительными и приступить к анализу статистических характеристик напряженности поля рассматриваемой апертурной СА.

### Статистические характеристики амплитуды и фазы комплексного вектора напряженности поля апертурной СА

На рис. 4а-в представлены графики распределения модуля  $|E|$  в пределах плоскости  $S_M$  с размерами  $20 \times 20 \text{ м}^2$  для трехэлементной решетки апертурных СА с параметрами  $l = 1,8 \text{ м}$ ;  $h = 1,5 \text{ м}$ ;  $d = 0,5 \text{ м}$  при  $R_A = 30 \text{ м}$  (здесь и далее обозначения а-в соответствуют частотам 1 МГц; 100 МГц; 0,5

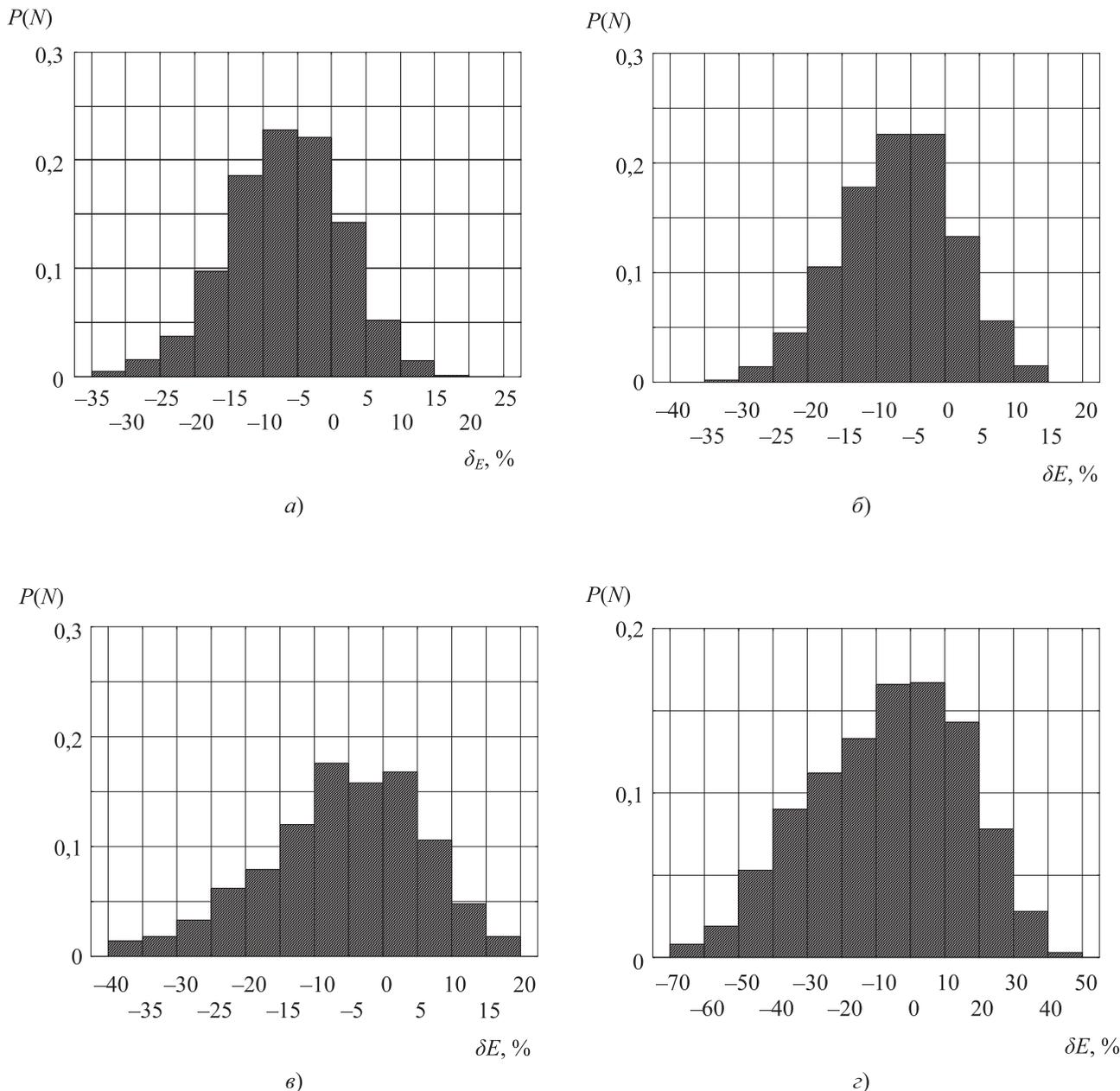


Рис. 5. Гистограммы распределения относительной погрешности  $\delta_E, \%$  для модуля  $|E|$ :  
 а) частота 1 МГц; б) 100 МГц; в) 0,5 ГГц; г) 1 ГГц.

ГГц и 1 ГГц) в случае отсутствия амплитудных  $a_E$  и фазовых  $\varphi_E$  ошибок.

Данные рис. 4 отражают характер структуры ЭМИ в представляющей интерес с точки зрения защиты КИ достаточно обширной пространственно-частотной области.

Совместное влияние амплитудных  $a_E$  и фазовых  $\varphi_E$  ошибок на модуль напряженности поля в точке  $Z = R_A = 30$  м;  $Y = 0$  иллюстрируют представленные на рис. 5а-в гистограммы  $P(\delta_E) = W_n / W_0$  относительных случайных отклонений  $\delta_E = (|E| - |E_A|) / |E_A|$ , в процентах, где  $|E|$  и  $|E_A|$  – модули комплексных амплитуд напряженности поля (точки сверху опущены),

найденные согласно (7) с помощью метода СИМ. Закон распределения ошибок – равномерный в пределах  $a_E [-0,2; 0,2]$  и  $\varphi_E [-45^\circ; 45^\circ]$ .

Гистограммы на рис. 5 построены для наихудшего с точки зрения искажения формы распределений, показанных на рис. 4, случая  $N_K = 1$ , при наличии и отсутствии ошибок соответственно;  $W_n$  – число значений  $|E|$ , попадающих в  $n$ -ый интервал на оси абсцисс;  $W_0 = 10^3$  – общее число реализаций  $|E|$ . По гистограммам, аналогичным приведенным на рис. 5, могут быть найдены оценки среднего значения, дисперсии, доверительного интервала и др., необходимые для проектирования систем защиты КИ.

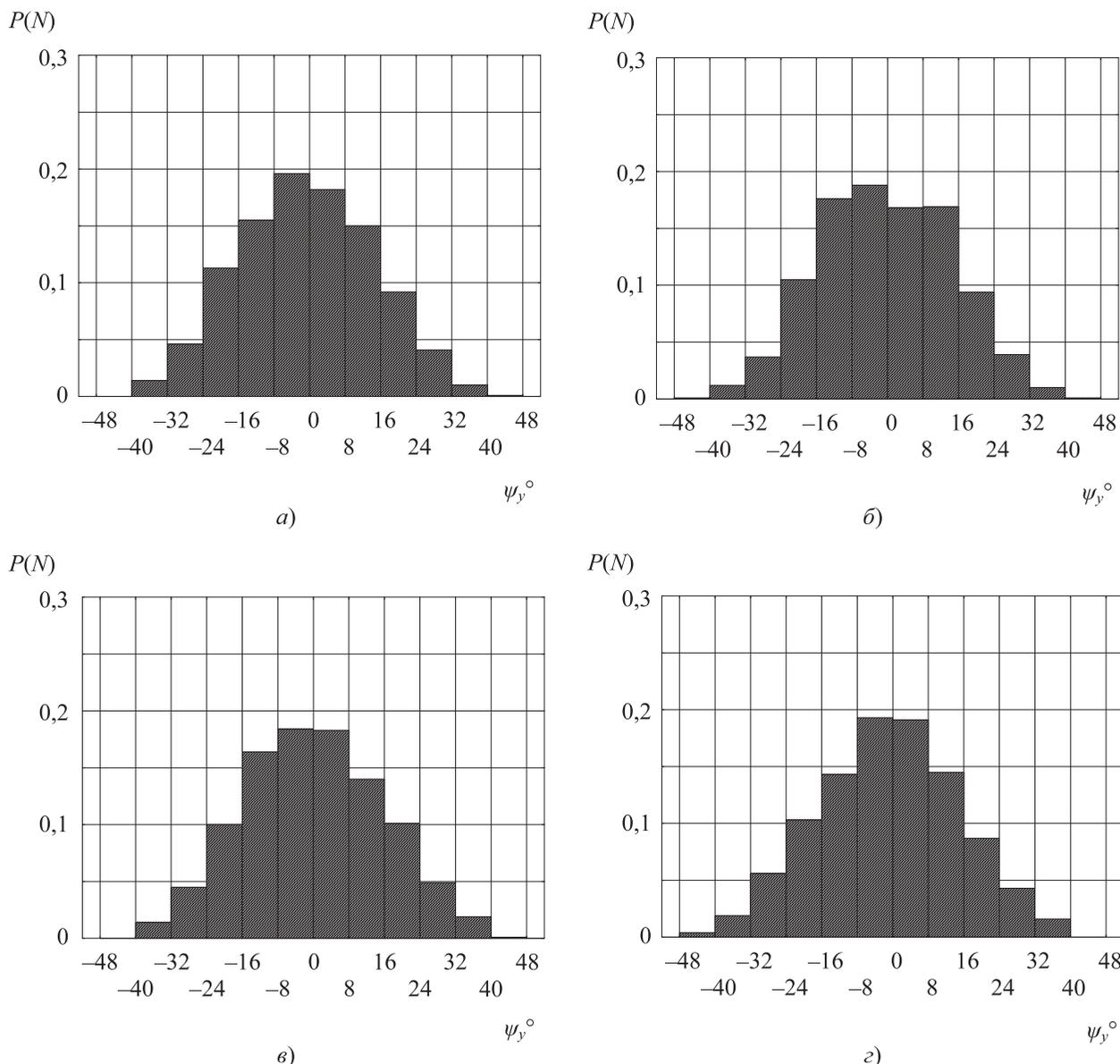


Рис. 6. Гистограммы распределения случайной фазы  $\psi_y^\circ$  для составляющей  $E_y$ :  
 а) частота 1 МГц; б) 100 МГц; в) 0,5 ГГц; г) 1 ГГц.

На рис. 6 представлены гистограммы  $P(\psi^\circ)$  значений случайного фазового угла

$$\psi_y = \arctg\left(\frac{\text{Im}(\dot{E}_y)}{\text{Re}(\dot{E}_y)}\right) - \psi_{y0}, \quad (10)$$

где  $\psi_{y0}$  – фаза  $\dot{E}_y$  при отсутствии ошибок, аналогичные приведенным на рис. 5. Гистограммы  $P(\Delta\psi^\circ)$  случайной разности фаз

$$\begin{aligned} \psi_y - \psi_z = & \arctg\left(\frac{\text{Im}(\dot{E}_y)}{\text{Re}(\dot{E}_y)}\right) - \\ & - \arctg\left(\frac{\text{Im}(\dot{E}_z)}{\text{Re}(\dot{E}_z)}\right) - \psi_{y0} + \psi_{z0}, \end{aligned} \quad (11)$$

где нижние индексы  $z$  относятся к  $\dot{E}_z$ , приведены на рис. 7. Значения углов  $\psi_{y0}$ ;  $\psi_{z0}$  и их разности на частотах 1 МГц; 100 МГц; 0,5 ГГц и 1 ГГц представлены в таблице 4.

Таблица 4. Фазы составляющих  $\dot{E}_y$ ;  $\dot{E}_z$  и их разность при отсутствии ошибок

Частота	1 МГц	100 МГц	0,5 ГГц	1 ГГц
$\psi_{y0}^\circ$	-36,06°	-6,2°	-30,9°	-60,2°
$\psi_{z0}^\circ$	144,04°	161,1°	93,4°	7,4°
$\psi_{y0} - \psi_{z0}^\circ$	-180,1°	-167,3°	-124,3°	-67,6°

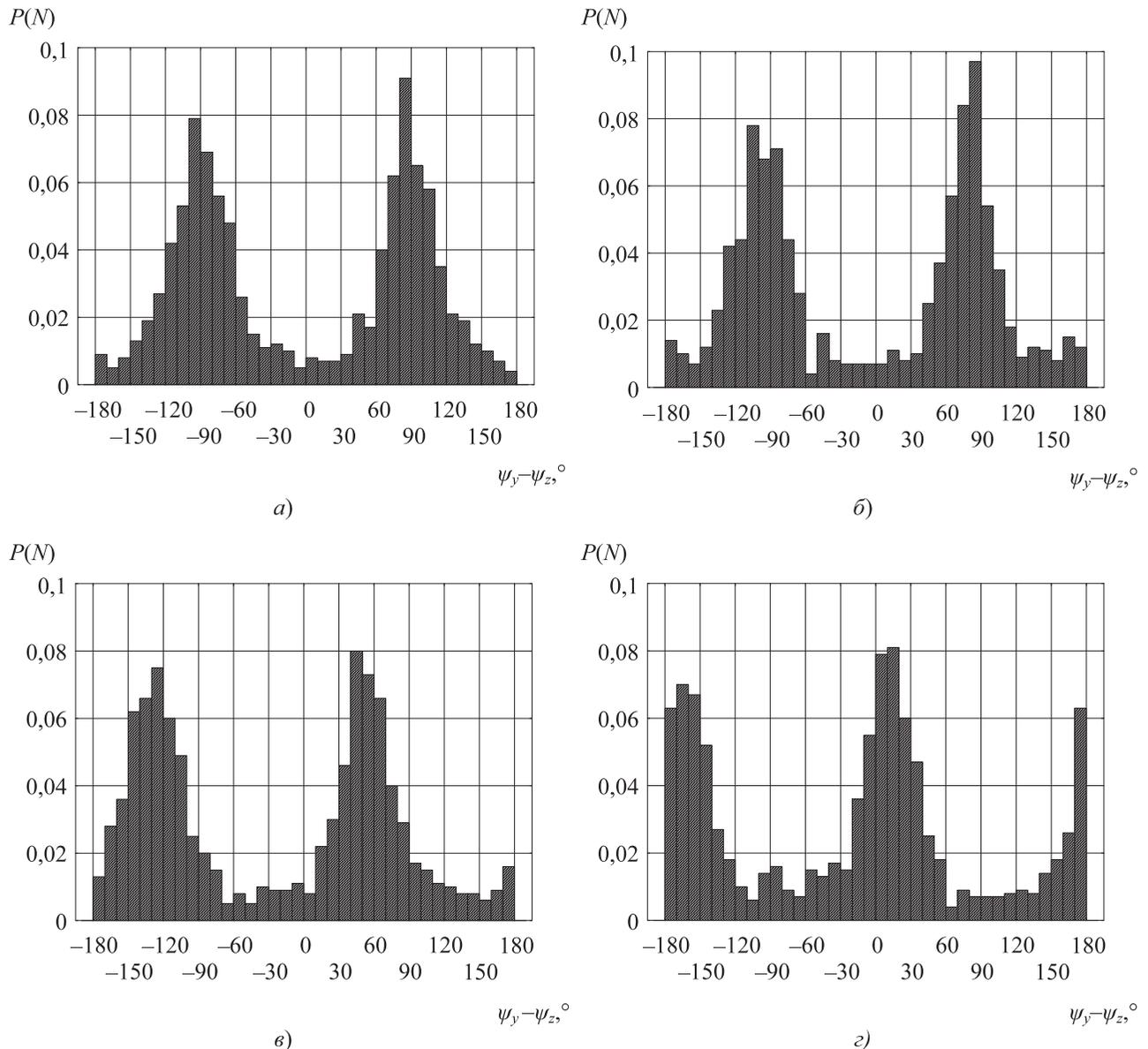


Рис. 7. Гистограммы распределения случайной разности фаз  $\psi_y - \psi_z$ :  
 а) частота 1 МГц; б) 100 МГц; в) 0,5 ГГц; з) 1 ГГц

Данные рис. 7, с учетом результатов расчета амплитуд составляющих  $E_x$ ;  $E_y$  и  $E_z$ , позволяют исследовать поляризационные свойства рассматриваемой СА. Поскольку в данном случае  $E_y \gg E_z$ , а  $E_x = 0$ , в центральной точке  $Z = R_A = 30$  м;  $Y = 0$  на частотах до 0,5 ГГц для большинства реализаций  $|E|$  имеет место стохастическая эллиптическая поляризация вектора  $\vec{E}$ , где левое и правое направления вращения практически равновероятны, а поляризационный эллипс сильно вытянут и ориентирован вдоль горизонтальной оси  $Y$  (см. рис. 1). На частоте 1 ГГц ситуация иная: здесь чаще всего имеет место стохастическая поляризация, близкая к линейной.

При необходимости из гистограмм, аналогичных представленным на рис. 6-7, также может

быть извлечена информация относительно числовых характеристик фазовых распределений всех составляющих напряженности поля СА в заданной пространственно-частотной области.

### Заключение

Актуальность и значимость исследования СА методом СИМ обусловлены практическим применением этого одного из наиболее перспективных направлений развития СТА в интересах проектирования систем активной защиты КИ [8; 12]. Теоретический интерес представляют возможности СИМ, связанные с исследованием структуры ЭМИ на разных расстояниях от СА и при разных вероятностных моделях амплитудных и фазовых ошибок, что является основным и традиционным

содержанием СТА. Кроме того, представленные в настоящей статье результаты анализа и моделирования характеристик апертурной СА в гармоническом режиме целесообразно дополнить аналогичными данными, относящимися к шумовому, импульсному и радиоимпульсному режимам работы СА [7], что также представляет интерес для проектирования перспективных систем защиты КИ.

### Литература

1. Маслов О.Н. Случайные антенны // Электросвязь. №7, 2006. – С. 12-15.
2. Алышев Ю.В., Маслов О.Н., Рябушкин А.В. Методы и средства исследования эффективности случайных антенн // Антенны. №4 (131), 2008. – С. 59-65.
3. Маслов О.Н., Шашенков В.Ф. Электромагнитное экранирование оборудования и помещений // Приложение к журналу «Инфокоммуникационные технологии». Вып. 7, 2011. – 256 с.
4. Маслов О.Н. Возможности и перспективы применения метода СИМ при решении внутренних задач СТА // ИКТ. Т.8, №2, 2010. – С. 8-22.
5. Маслов О.Н., Раков А.С. Статистическое имитационное моделирование характеристик сигнала возбуждения САФАР // ИКТ. Т.4, №1, 2006. – С. 45-52.
6. Кочержевский Г.Н. Антенно-фидерные устройства. М.: Связь, 1972. – 472 с.
7. Алышев Ю.В., Маслов О.Н., Раков А.С., Рябушкин А.В. Исследование случайных антенн методом статистического имитационного моделирования // Успехи современной радиоэлектроники. №7, 2008. – С. 3-41.
8. Маслов О.Н. Применение метода статистического имитационного моделирования для исследования случайных антенн и проектирования систем активной защиты информации // Успехи современной радиоэлектроники. №6, 2011. С. 42-55.
9. Маслов О.Н., Раков А.С. Направленные свойства линейной случайной антенны с учетом корреляционной связи между ошибками // Антенны. №3, 2010. – С. 54-62.
10. Маслов О.Н. Устойчивые распределения и их применение в радиотехнике. М.: Радио и связь, 1994. – 152 с.
11. Маслов О.Н., Раков А.С. Имитационное моделирование распределений модуля случайного многомерного вектора // ИКТ. Т.3, №4, 2005. – С. 53-56.
12. Маслов О.Н. О моделировании риска принятия решений в области обеспечения информационной безопасности // Защита информации. №4, 2011. – С. 16-20; №5, 2011. – С. 12-15.

## STATISTIC CHARACTERISTICS OF FIELD OF APERTURE RANDOM ANTENNA

Maslov O.N., Rakov A.S., Silkin A.A.

This paper contains a description of the application domain and initial conditions for statistic imitation method (SIM) of characteristics of the field antenna array, which consists of three rectangular apertures. This array is excited by a random signal and represents a aperture random antenna (RA). The results of investigations by SIM of the statistical characteristics of the field intensity aperture RA are presented in this article. Distribution of amplitude and phase errors are considered uniform in a specified sufficiently wide range. The technique SIM is based on the application of the Monte Carlo method, this technique uses, developed by the authors, a new procedure of «raffle» random errors with arbitrary distribution.

**Keywords:** aperture random antenna, statistic characteristics, statistic imitation modeling method.

Маслов Олег Николаевич, д.т.н., профессор, заведующий Кафедрой «Экономические и информационные системы» (ЭИС) Поволжского государственного университета телекоммуникаций и информатики (ПГУТИ). Тел. (8-846) 271-06-24. E-mail: maslov@psati.ru

Раков Александр Сергеевич, к.т.н., доцент Кафедры «Мультисервисные сети и информационная безопасность» ПГУТИ. Тел. 8-917-017-34-15.

Силкин Алексей Андреевич, аспирант Кафедры ЭИС ПГУТИ. Тел. 8-909-344-70-39.