

# ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ СОВМЕСТИМОСТЬ И БЕЗОПАСНОСТЬ ОБОРУДОВАНИЯ

УДК 621.396.677; 621.397.671

## СТАТИСТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОЛЯ РАДИОВОЛН В ОФИСНОМ ПОМЕЩЕНИИ

*Кубанов В.П., Кустова М.Н., Маслов О.Н., Степанова Н.В., Шаталов И.С.  
Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики, Самара, РФ  
E-mail: kubanov@psati.ru*

В статье представлены результаты экспериментального исследования уровней электромагнитного поля (ЭМП) внутри многоэтажного офисного здания. Приведены гистограммы декартовых ортогональных составляющих, модулей и сферических угловых характеристик векторов напряженности электрического и магнитного поля. В качестве измерительных средств использован анализатор спектра FS300 производства Rode & Schwarz в комплекте с малогабаритными вибраторной и рамочной антеннами. Измерения проводились на частотах 49,75 МГц и 56,25 МГц и высотах 1 м и 1,7 м расположения точки наблюдения над полом прямоугольного помещения площадью 48 м<sup>2</sup>. Полученные данные являются основой для решения широкого круга прикладных задач (от обеспечения безопасности рабочих мест по фактору ЭМП до формирования ЭМП-каналов утечки конфиденциальной информации из помещения) методом статистического имитационного моделирования.

**Ключевые слова:** многоэтажное здание, офисное помещение, электромагнитное поле радиоволн, статистические характеристики

### Введение

Исследование структуры электромагнитного поля (ЭМП) радиоволн внутри офисного (также производственного, учебно-лабораторного, торгового и т.п.) помещения, расположенного в городском мегаполисе, до настоящего времени представляет собой актуальную научно-технологическую задачу [1]. Решение этой задачи может быть связано с целым рядом важных практических приложений, причем источники ЭМП могут располагаться как внутри, так и за пределами представляющего интерес помещения [2-6]. Предметом исследования обычно является амплитудный уровень (модуль вектора) напряженности электрического поля (далее  $E$ -поля), что обусловлено следующими причинами.

1. Экспертиза эколого-эргономической безопасности помещений по фактору ЭМП проводится с использованием в качестве одного из главных нормативных критериев уровня энергетической экспозиции  $E$ -поля, с которыми могут быть связаны уровни других критериев (по магнитному  $H$ -полю, по плотности потока мощности ЭМП) [3].

2. Амплитудные уровни  $E$ -поля позволяют однозначно оценить условия приема радиосигналов в помещении, если считать, что соответствующие им уровни  $H$ -поля могут быть найдены через волновое сопротивление окружающей среды (обычно в виде свободного пространства) [7-8].

3. Амплитудные уровни  $E$ -поля и  $H$ -поля фигурируют при проведении специальных исследований, проводимых в интересах обеспечения информационной безопасности помещений по фактору ЭМП [9] и т.д.

Однако системный подход к исследованию ЭМП радиоволн в помещении требует комплексного анализа всех присущих ему атрибутов и свойств, характеристик и параметров, к числу которых относятся статистические характеристики:

- ортогональных составляющих (ОС) векторов  $E$ -поля  $E_{x,y,z}$  и  $H$ -поля  $H_{x,y,z}$  в декартовой системе координат, соответствующей форме прямоугольного помещения;

- амплитудных уровней  $E$ -поля и  $H$ -поля, которые по определению равны  $E_m = \sqrt{E_x^2 + E_y^2 + E_z^2}$  и  $H_m = \sqrt{H_x^2 + H_y^2 + H_z^2}$ ;

- сферических угловых координат пространственного расположения векторов  $E$ -поля и  $H$ -поля, также по определению равные

$$\varphi_E = \arctg(E_y / E_x); \quad \varphi_H = \arctg(H_y / H_x);$$

$$\theta_E = \arccos(E_z / E_m); \quad \theta_H = \arccos(H_z / H_m).$$

Экспериментальные материалы, которые можно принять в качестве исходных данных при моделировании структуры ЭМП радиоволн в помещении современными компьютерными методами, в необходимом объеме сегодня отсутствуют. Целью статьи является частичное восполнение этого пробела.

### Методика измерений

Объектом исследования является прямоугольное помещение учебно-научной лаборатории площадью 48 м<sup>2</sup> на четвертом этаже здания в центре мегаполиса. Нумерация 14 точек измерения вдоль 9 рядов шла вглубь помещения от двух окон, через которые в него поступают радиоволны. Измерения проводились на частотах 49,75 МГц и 56,25 МГц на высоте 1 м и 1,7 м от поверхности пола; оси  $x$  и  $y$  декартовой системы координат считались горизонтальными (параллельными полу), ось  $z$  – вертикальной. В качестве измерительных средств использовался анализатор спектра FS300 производства Rode & Schwarz в комплекте с малогабаритными вибраторной и рамочной антеннами. Показания FS300 из дБмВт пересчитывались в уровни  $E$ -поля; мкВ/м, и  $H$ -поля; мкА/м, соответствующие ОС  $E_{x,y,z}$  и  $H_{x,y,z}$  с учетом коэффициентов калибровки вибраторной и рамочной антенн на указанных частотах. После этого проводился расчет по вышеприведенным формулам амплитудных уровней  $E_m$  и  $H_m$ , а также углов  $\varphi_{E,H}$  и  $\theta_{E,H}$ .

Обработка экспериментальных данных предусматривала построение графиков и гистограмм, в максимально наглядной форме характеризующих свойства ЭМП радиоволн в помещении. Поскольку представляли интерес главным образом качественные закономерности поведения (распределения в пространстве) уровней ОС, амплитуд и угловых характеристик векторов  $E$ -поля и  $H$ -поля, количественный анализ метрологической точности полученных результатов при этом не проводился. В общей сложности было произведено и обработано более 500 измерений уровней  $E$ -поля и  $H$ -поля.

### Раздельный анализ уровней $E$ -поля и $H$ -поля

В соответствии с теорией Максвелла, ЭМП радиоволн представляет собой единый физический процесс, в котором изменение  $E$ -поля ведет к возникновению  $H$ -поля, вызывающего появление  $E$ -поля и т.д., причем взаимная связь между ними является каузальной, детерминированной. Как следствие, при правильной калибровке вибраторных и рамочных антенн они должны обеспечивать однозначно соответствующие друг другу показания измерителей уровней  $E$ -поля и  $H$ -поля (если считать, что результаты, полученные с помощью вибраторной антенны, соответствуют уровням  $E$ -поля, а результаты измерения рамочной антенной – уровням  $H$ -поля). Практический опыт, однако, показывает, что так бывает далеко не всегда: мало того, что показания тщательно

прокалиброванных вибраторных и рамочных антенн не соответствуют друг другу, пространственно-частотные распределения уровней  $E$ -поля и  $H$ -поля в одних и тех же условиях вообще ведут себя по-разному. Впервые этот важный факт был установлен и подтвержден более четверти века тому назад при разработке отечественных систем синхронного радиовещания на средних волнах [7].

Согласно [8], это объясняется различным характером интерференции сонаправленных и встречных радиоволн, по-разному формирующих ЭМП возникающей стоячей волны. В первом случае пространственные структуры  $E$ -поля и  $H$ -поля для суммарного ЭМП по узлам и пучностям полностью совпадают, что не является неожиданностью, поскольку на данном факте базируется вся теория антенн в зоне Фраунгофера – где раздельное определение  $E_m$  и  $H_m$  в свободном пространстве (при  $E_m/H_m = 120\pi$  Ом) действительно не имеет смысла [2-3].

Во втором случае узлы и пучности  $E$ -поля и  $H$ -поля в составе суммарного ЭМП, создаваемого встречными волнами, максимальным образом не совпадают друг с другом. Если, например, на расстоянии  $r$  в момент времени  $t$  на частоте  $f$  возникает пучность  $E$ -поля, то в этой же точке имеет место узел  $H$ -поля, и наоборот: узел  $E$ -поля соответствует пучности  $H$ -поля. Аналогичная картина имеет место при отражении плоской волны от препятствий на пути ее распространения в свободном пространстве [8]. На практике это явление может быть «замаскировано» стохастическими эффектами, присущими случайно-неоднородной среде – но при наличии интенсивных отражений (как на открытых местах, так и на трассах с затенением) оно должно проявляться всегда. В то же время при отсутствии отражений узлы и пучности  $E$ - и  $H$ -полей будут взаимно совпадать.

Поэтому, например при анализе условий формирования каналов утечки конфиденциальной информации в компьютерных сетях, необходимо раздельно исследовать структуру  $E$ - и  $H$ -полей как теоретическим, так и экспериментальным путем. Это целесообразно еще и потому, что полоса частот для указанных каналов является «суперширокой»: от 1 кГц и менее до 1 ГГц и более, так что на разных частотах одна и та же точка измерения ЭМП будет находиться в разных пространственных зонах, где  $E$ - и  $H$ -поля ведут себя заведомо неодинаково [4; 9 и др.].

На рис. 1 в качестве примера представлены совмещенные графики распределения уровней ЭМП тестового сигнала с частотой 56,25 МГц на высоте 1,7 м от пола, измеренных малогабаритными вибраторной (кривые 1) и рамочной (кривые 2) антеннами.

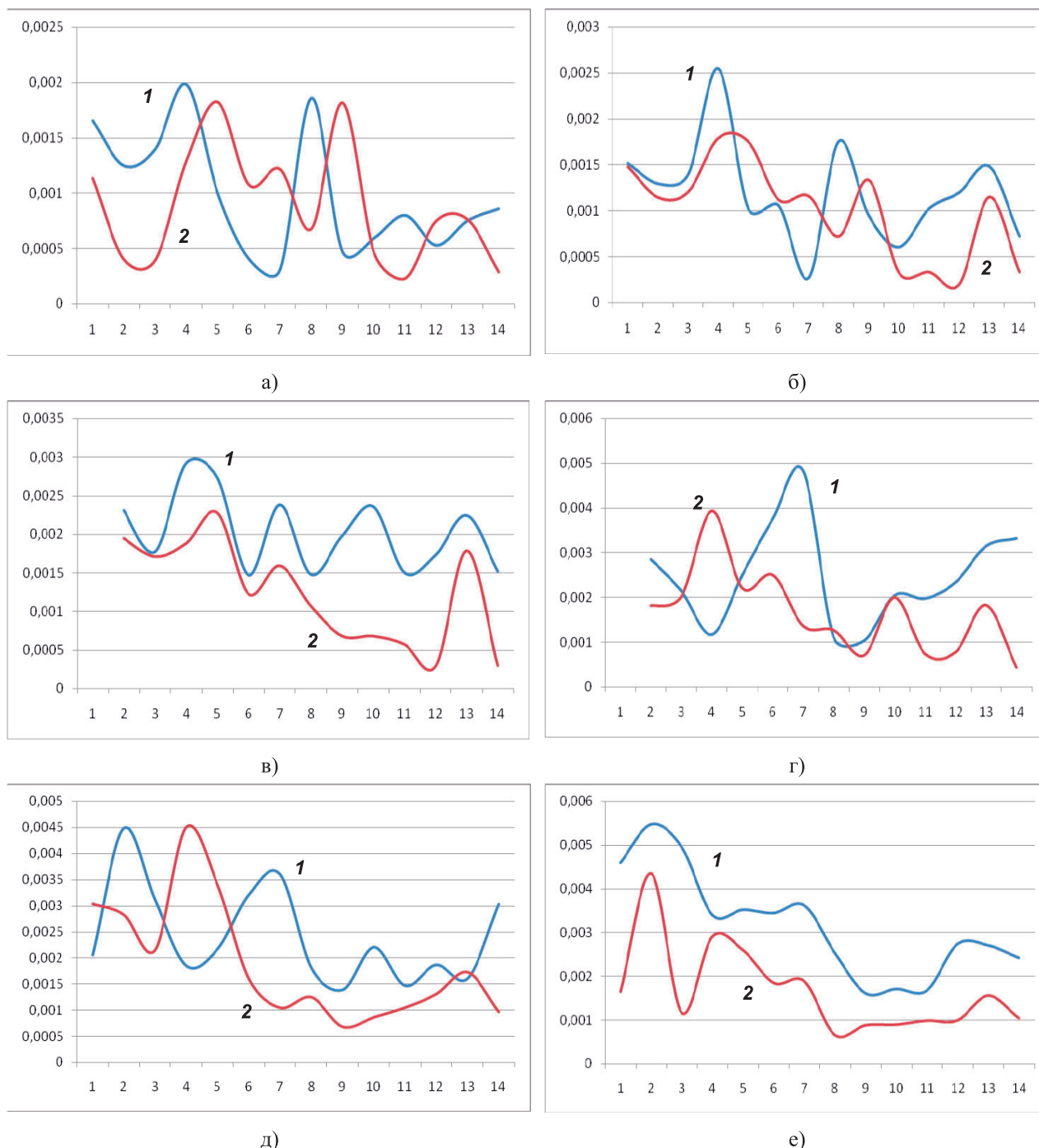


Рис. 1. Распределения уровней ЭМП на частоте 56,25 МГц, измеренных вибраторной (графики 1) и рамочной (графики 2) антеннами на высоте 1,7 м от поверхности пола

Данные рис. 1а-1в соответствуют 2; 3 и 4 рядам в правой части помещения, данные рис. 1г-1е – 6; 7 и 8 рядам в левой части помещения. На оси абсцисс указаны номера точек, на оси ординат – соответствующие им результаты пересчета уровней сигнала на выходах антенн в уровни  $E$ - и  $H$ -поля после обработки результатов измерений по всем их ОС (поперечные  $E_x$  и  $H_x$ , продольные  $E_y$  и  $H_y$ , вертикальные  $E_z$  и  $H_z$  относительно поверхности пола), с вычислением их амплитудных значений  $E_m$  и  $H_m$ . Поскольку представляет интерес лишь

относительное расположение совмещенных графиков, единицы измерения соответствующих им уровней ЭМП на оси ординат рис. 1 не указаны.

Если считать, как уже было сказано, что результаты, полученные с помощью вибраторной антенны, соответствуют уровням  $E$ -поля, а результаты измерения рамочной антенной – уровням  $H$ -поля, то, согласно рис. 1, в данном случае имеют место как прямое прохождение радиоволн от окон вглубь помещения, так и его достаточно интенсивные отражения от стен – поскольку

на графиках в разных рядах налицо участки, где узлы и пучности  $E$ -поля и  $H$ -поля то повторяют друг друга, то имеют взаимно противоположный характер.

Это, во-первых, иллюстрирует необходимость раздельного исследования пространственных распределений и статистических свойств векто-

ров  $E$ -поля и  $H$ -поля в рассматриваемом помещении. Во-вторых, подтверждает правомерность методики и результатов теоретического моделирования ЭМП сонаправленных и встречных радиоволн, изложенные в [8]. В-третьих, позволяет перейти к исследованию характеристик ЭМП в помещении статистическим методом.

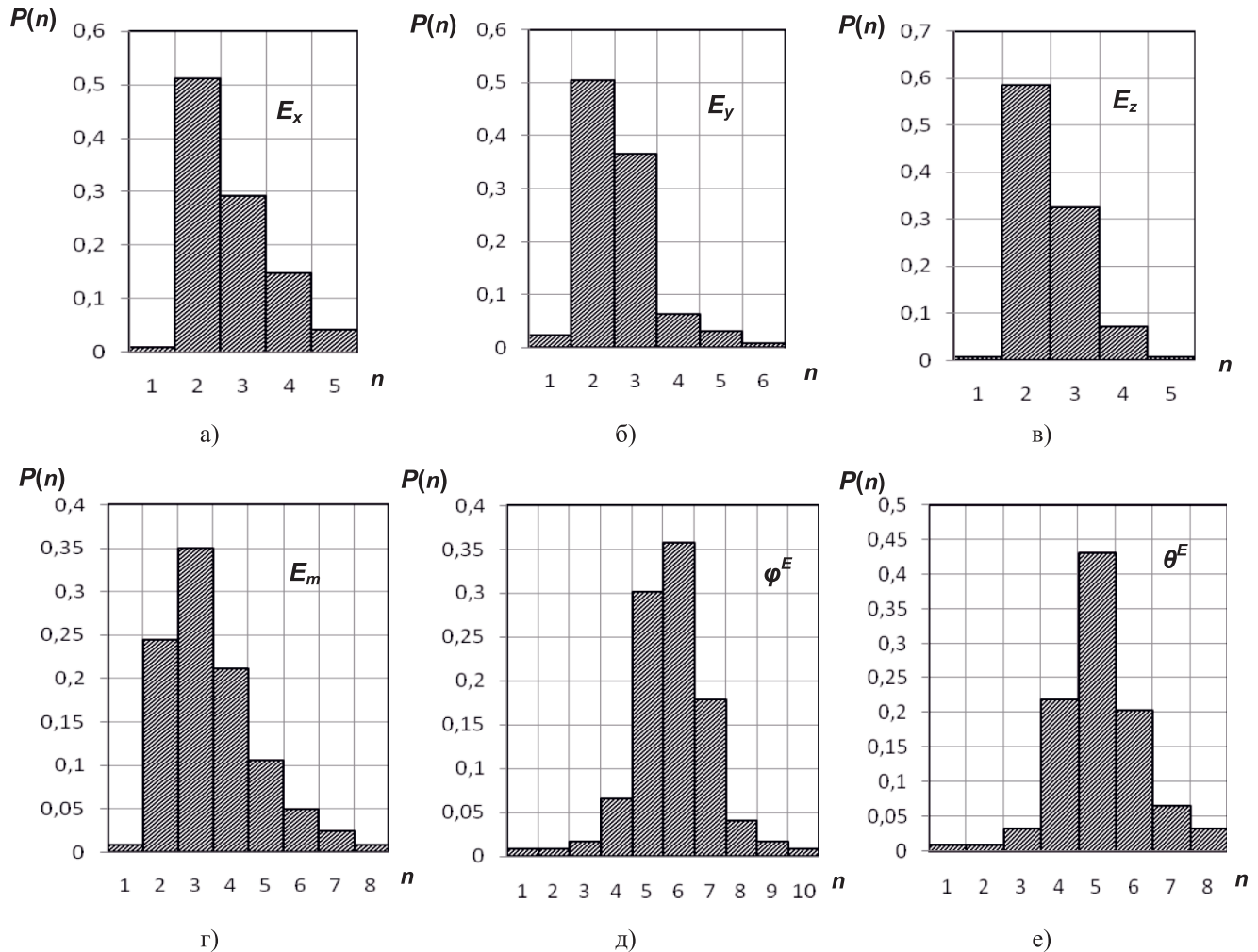


Рис. 2. Статистические характеристики  $E$ -поля на частоте 56,25 МГц на высоте 1,7 м от пола

### Статистические характеристики уровней ОС, амплитуд и сферических угловых координат векторов $E$ -поля и $H$ -поля

На рис. 2 приведены гистограммы, демонстрирующие статистические свойства вектора  $E$ -поля: уровней ОС  $E_{x,y,z}$  (см. рис. 2а-2в), амплитудного уровня  $E_m$  (рис. 2г), азимутального угла  $\varphi_E$  (рис. 2д) и меридионального угла  $\theta_E$  (рис. 2е) в условиях, соответствующих рис. 1. На оси абсцисс указаны номера интервалов  $n$ , каждый из которых для рис. 2а-2г соответствует шагу

1 мВ/м; для рис. 2д-2е – шагу  $10^\circ$ . На оси ординат указаны значения частоты  $P(n)$  попадания указанных случайных величин в эти интервалы.

На рис. 3 приведены аналогичные гистограммы для вектора  $H$ -поля: уровней ОС  $H_{x,y,z}$  (рис. 3а-3в); амплитудного уровня  $H_m$  (рис. 3г); азимутального угла  $\varphi_H$  (рис. 3д) и меридионального угла  $\theta_H$  (рис. 3е). Интервалы, номера  $n$  которых указаны на оси абсцисс, для рис. 3а-3г соответствует шагу 200 мкА/м; для рис. 3д-3е – шагу  $10^\circ$ . Обозначения на оси ординат здесь те же, что на рис. 2.



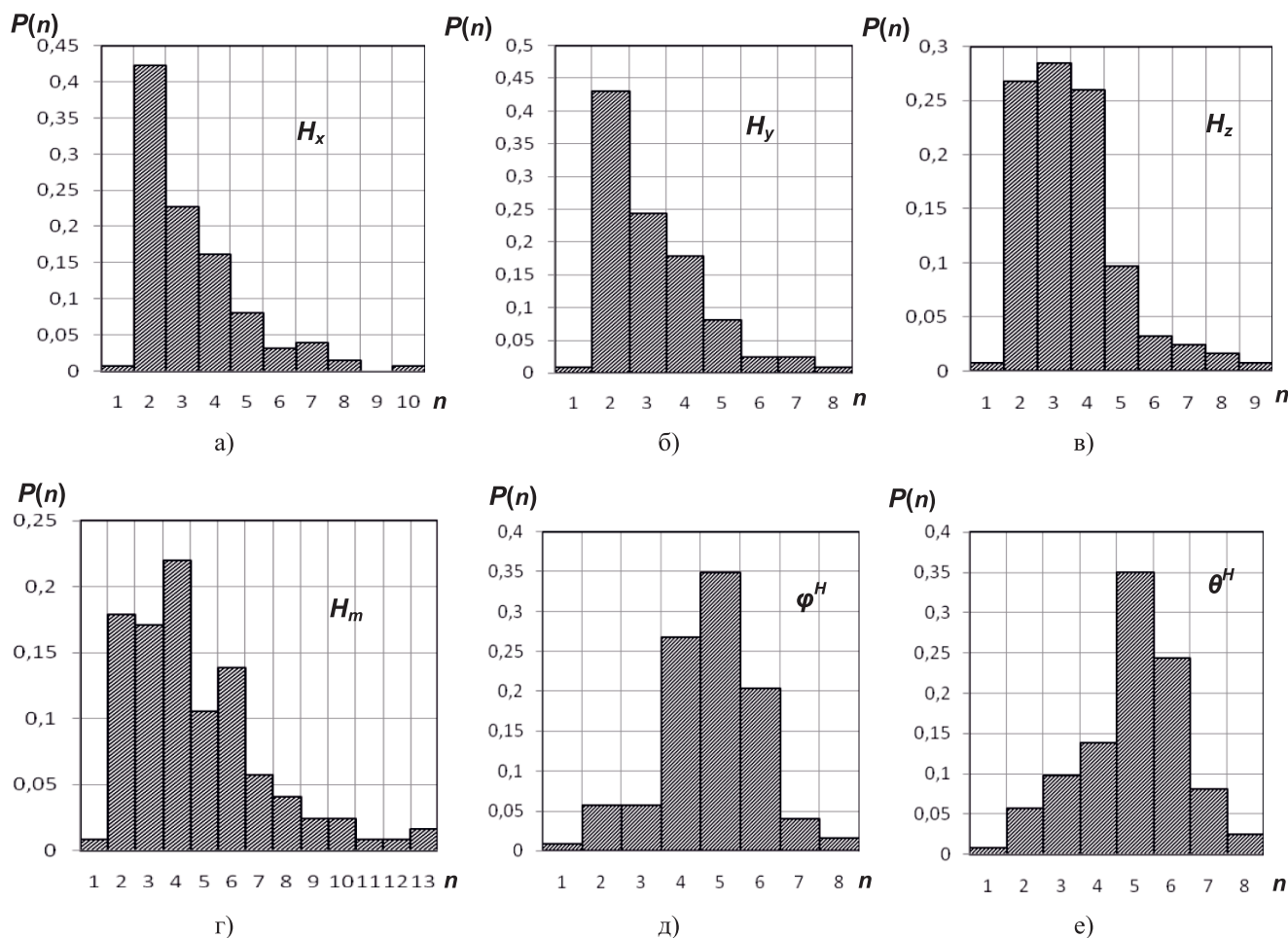


Рис. 3. Статистические характеристики  $H$ -поля на частоте 56,25 МГц на высоте 1,7 м от пола

## Выводы

1. Гистограммы  $E_{x,y,z}$  и  $H_{x,y,z}$ ,  $E_m$  и  $H_m$ ,  $\varphi_E$  и  $\varphi_H$ ,  $\theta_E$  и  $\theta_H$ , приведенные на рис. 2-3, существенно различаются между собой – это подтверждает необходимость и целесообразность раздельного исследования статистических характеристик  $E$ -поля и  $H$ -поля, что следует из анализа графиков на рис. 1.

2. Гистограммы амплитудных уровней  $E_m$  и  $H_m$  векторов  $E$ -поля и  $H$ -поля, представленные на рис. 2-3, близки по форме к закону Релея. Это также соответствует данным рис. 1, поскольку позволяет предположить, что структуру ЭМП в помещении формируют многолучевой сигнал в виде прямой волны, проходящей через окна, и совокупность волн, отраженных от стен, потолка и пола. Физическая сущность данного предположения, а также его непротиворечивость известным научным фактам сомнений не вызывает.

3. Гистограммы углов  $\varphi_{E;H}$  и  $\theta_{E;H}$  близки к нормальному закону, что может говорить о применимости в данном случае условий центральной предельной теоремы теории вероятностей

[2]. Они иллюстрируют вид поляризации радиоволн, не совпадающий с ее типовыми вариантами (линейная, круговая, эллиптическая). Поскольку ориентация векторов  $E$ -поля и  $H$ -поля в пределах помещения меняется случайным образом, такую поляризацию, по аналогии с [10], можно именовать стохастической и исследовать ее свойства непосредственно по распределениям  $\varphi_{E;H}$  и  $\theta_{E;H}$ .

4. Самостоятельный интерес представляет применение полученных данных в интересах предотвращения утечки конфиденциальной информации во внешнюю среду через ЭМП, присутствующее в помещении [4].

## Литература

1. Методы комплексного контроля безопасности информации на объектах телекоммуникационных систем органов государственного управления. М.: Изд. УДП РФ, 2009. – 368 с.
2. Маслов О.Н. Устойчивые распределения и их применение в радиотехнике. М.: Радио и связь, 1994. – 152 с.

3. Маслов О.Н. Экологический риск и электромагнитная безопасность. М.: ИРИАС, 2004. – 330 с.
4. 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.
5. Заседателева П.С., Маслов О.Н., Рябушкин А.В., Щербакова Т.А. Особенности моделирования режимов возбуждения многоканальных случайных антенн // Инфокоммуникационные технологии. Т.10, №1, 2012, с.78-89.
6. Заседателева П.С., Маслов О.Н. Пространственно-частотные характеристики электромагнитного возбуждения комплекса случайных антенн // Инфокоммуникационные технологии. Т.10, №2, 2012, с.93-98.
7. Синхронное радиовещание. Под ред. А.А. Пирогова. М.: Радио и связь, 1989. – 160 с.
8. Маслов О.Н. Интерференционные модели волновых полей сосредоточенных электромагнитных излучателей // Антенны. №11, 2016. – С. 14-22.
9. Маслов О.Н. Случайные антенны: теория и практика. Самара: Изд-во ПГУТИ-ОФОРТ, 2013. – 480 с. // URL: [http://eis.psuti.ru/images/books/sluch ant](http://eis.psuti.ru/images/books/sluch_ant) (д.о. 20.09.2017).
10. Аверьянова А.Н., Маслов О.Н., Раков А.С. Поляризационные характеристики поля апертурной случайной антенны в зонах Френеля и Фраунгофера // Радиотехника. №4, 2017. – С. 70-76.

*Получено 25.09.2017*

**Кубанов Виктор Павлович**, д.т.н., профессор Кафедры радиосвязи, радиовещания и телевидения (РРТ) Поволжского государственного университета телекоммуникаций и информатики (ПГУТИ). Тел. (8-846) 339-11-06. E-mail: [kubanov@psati.ru](mailto:kubanov@psati.ru)

**Кустова Марина Николаевна**, к.т.н., доцент Кафедры систем связи ПГУТИ. Тел. 8-964-991-68-22. E-mail: [kustova@psati.ru](mailto:kustova@psati.ru)

**Маслов Олег Николаевич**, д.т.н., профессор, заведующий Кафедрой прикладной информатики (ПИ) ПГУТИ. Тел. (8-846) 228-00-36; 8-917-950-05-13. E-mail: [maslov@psati.ru](mailto:maslov@psati.ru)

**Степанова Наталья Вениаминовна**, аспирант Кафедры РРТ ПГУТИ. Тел. (8-846) 339-11-15. E-mail: [puhleniw@mail.ru](mailto:puhleniw@mail.ru)

**Шаталов Иван Сергеевич**, аспирант Кафедры ПИ ПГУТИ. Тел. (8-846) 228-00-36; 8-927-732-54-22. E-mail: [maslov@psati.ru](mailto:maslov@psati.ru)

## STATISTICAL CHARACTERISTICS OF RADIO WAVES FIELD IN OFFICE ROOM

*Kubanov V.P., Kustova M.N., Maslov O.N., Stepanova N.V., Shatalov I.S.  
Povolzhskiy State University of Telecommunication and Informatics, Samara, Russia Federation  
E-mail: [kubanov@psati.ru](mailto:kubanov@psati.ru)*

The paper presents the results of an experimental study of the electromagnetic field (EMF) levels inside a multi-storey office building. Histograms of Cartesian orthogonal components, modules, and spherical angular characteristics of the electric and magnetic field strength vectors are presented. The Rode & Schwarz spectrum analyzer FS300 is used as a measuring instrument equipped with small vibrator and loop antennas. The measurements were carried out at frequencies of 49,75 MHz and 56,25 MHz and heights of 1 and 1,7 m and the observation point was located above the floor of a rectangular room of 48 square metres. The data obtained can be used as a basis for solving a wide range of applied problems with statistical simulation method: from ensuring the safety of EMF-based workplaces to creating EMF-channels for leaking of confidential data.

**Keywords:** multi-storey building, office room, radio waves electromagnetic field, statistical characteristics

**DOI:** 10.18469/ikt.2017.15.4.14

**Kubanov Viktor Pavlovich**, Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics, 77, Moscovskoe shosse, Samara 443090, Russian Federation; Professor of the Department of Electrodynamics and Antennas, Doctor of Technical Sciences, Professor. Tel.: +78462280022. E-mail: kubanov@psati.ru.

**Kustova Marina Nikolaevna**, Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics, 23 Lev Tolstoy str., Samara 443010, Russian Federation; Associate Professor of the Department of Communication Systems; PhD in Technical Science. Tel.: +79649916822. E-mail: kustova@psati.ru.

**Maslov Oleg Nikolayevich**, Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics, 23 Lev Tolstoy str., Samara 443010, Russian Federation; the Head of Department of Applied Informatics, Doctor of Technical Science, Professor. Tel.: +79023710624. E-mail: maslov@psati.ru

**Stepanova Natalia Veniaminovna**, Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics, 23 Lev Tolstoy str., Samara 443010, Russian Federation; PhD student of the Department of Radio Communication, Radio Broadcasting and Television. Tel.: +78463391115. E-mail: puhleniw@mail.ru

**Shatalov Ivan Sergeevich**, Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics, 23 Lev Tolstoy str., Samara 443010, Russian Federation; PhD student of the Department of Applied Informatics. Tel.: +7-846-228-00-36, +79277325422. E-mail: shatalovivv@gmail.com

## References

1. *Metody kompleksnogo kontrolja bezopasnosti informacii na ob'ektah telekommunikacionnyh sistem organov gosudarstvennogo upravlenija* [Methods of integrated control of information security at telecommunication systems objects of government bodies]. Moscow, UDP RF Publ., 2009. 368 p.
2. Maslov O.N. *Ustojchivye raspredelenija i ih primenenie v radiotekhnike* [Stable distributions and their application in radio engineering]. Moscow, Radio i svjaz' Publ., 1994. 152 p.
3. Maslov O.N. *Jekologicheskij risk i jelektromagnitnaja bezopasnost'* [Environmental risk and electromagnetic safety]. Moscow, IRIAS Publ., 2004. 330 p.
4. Maslov O.N. *Primenenie metoda statisticheskogo imitacionnogo modelirovanija dlja issledovanija sluchajnyh antenn i proektirovanija sistem aktivnoj zashhity informacii* [Application of the method of statistical simulation for the study of random antennas and the design of active information protection systems] *Uspehi sovremennoj radiojelektroniki*, 2011, no. 6, pp. 42-55.
5. Zasedateleva P.S., Maslov O.N., Rjabushkin, Shherbakova T.A. *Osobennosti modelirovanija rezhimov vozvuzhdenija mnogokanal'nyh sluchajnyh antenn* [Features of simulation of excitation modes of multichannel random antennas]. *Infokommunikacionnye tehnologii*, 2012, vol. 10, no. 1, pp.78-89.
6. Zasedateleva P.S., Maslov O.N. *Prostranstvenno-chastotnye harakteristiki jelektromagnitnogo vozvuzhdenija kompleksa sluchajnyh antenn* [Spatial-frequency characteristics of electromagnetic excitation of a complex of random antennas]. *Infokommunikacionnye tehnologii*, 2012, vol. 10, no. 2, pp. 93-98.
7. Pirogov A.A. *Sinhronnoe radioveshhanie* [Synchronous broadcasting]. Moscow, Radio i svjaz' Publ., 1989. 160 p.
8. Maslov O.N. *Interferencionnye modeli volnovyh polej sosredotochennyh jelektromagnitnyh izluchatelej* [Interference models of wave fields of concentrated electromagnetic emitters]. *Antenny*, 2016, no. 11, pp. 14-22.
9. Maslov O.N. *Sluchajnye anteny: teorija i praktika* [Random antennas: theory and practice]. Samara, PGUTI-OFORT Publ., 2013. 480 p. Available at: [http://eis.psuti.ru/images/books/sluch\\_ant](http://eis.psuti.ru/images/books/sluch_ant) (accessed 20.09.2017).
10. Aver'janova A.N., Maslov O.N., Rakov A.S. *Poljarizacionnye harakteristiki polja aperturnoj sluchajnoj anteny v zonah Frenelja i Fraunhofer* [Polarization characteristics of the field of an aperture random antenna in the Fresnel and Fraunhofer zones]. *Radiotekhnika*, 2017, no. 4, pp. 70-76.

Received 25.09.2017