

range. Justified the name of this phenomenon as “centrifugal error” transmission, the basic functions and numerical characteristics of its probabilistic description. Possible ways to eliminate the negative impact of this type of distortion to improve the noise immunity of transmission systems of numerical information.

**Keywords:** Gaussian channel, centrifugal error, noise immunity, interference, the magnitude of the mean square error recovery frequency energy transmission conditions, the energy of the signal, the Gray code.

Рассомахин Сергей Геннадьевич, д.т.н., доцент, заведующий Кафедрой защиты информационных систем и технологий Харьковского Национального университета им. В.Н. Каразина. E-mail: skandin@mail.ru

Малофей Олег Павлович, к.т.н., профессор Кафедры высшей алгебры и геометрии Северо-Кавказского федерального университета. Тел. (8-865) 247-47-99. E-mail: skandin@mail.ru

Малофей Александр Олегович, к.т.н., профессор Кафедры тактико-специальной и огневой подготовки Ставропольского филиала Краснодарского университета МВД РФ. Тел. (8-865) 293-62-88. E-mail: skandin@mail.ru

УДК 621.396.677; 621.397.671

## ТЕОРИЯ СЛУЧАЙНЫХ АНТЕНН: АТРИБУТЫ И ОТЛИЧИТЕЛЬНЫЕ ОСОБЕННОСТИ

*Маслов О.Н.*

Обсуждаются отличия методов и средств теории случайных антенн от близких ей разделов теоретической радиотехники и теории компьютерного моделирования.

**Ключевые слова:** теория случайных антенн, статистическая теория антенн, неопределенность знаний, компьютерное имитационное моделирование, метод Монте-Карло, теория рассеяния волн, статистически неровные поверхности.

### Введение

Проиллюстрировать как общность, так и различие между традиционной теорией антенно-фидерных устройств (АФУ) [1] и статистической теории антенн (СТА) [2], одним из актуальных направлений развития которой является теория случайных антенн (СА) [3], можно на примере атрибутов (характеристик и параметров) теории АФУ.

Первой среди них, безусловно, является характеристика направленности, которую представляют графические изображения ее сечения поверхностями заданного вида – диаграммы направленности (ДН). Назначением ДН является демонстрация угловых распределений уровней электрической  $E$ - и магнитной  $H$ -составляющих электромагнитного поля (ЭМП), создаваемого АФУ на заданном расстоянии, – этот смысл ДН сохраняют в СТА с учетом двух новых обстоятельств.

Во-первых, учет случайных ошибок ведет к необходимости рассматривать вероятностные

реализации ДН, которые лучше соответствуют реальным условиям работы АФУ (это же относится ко всем параметрам, определяемым через ДН, – таким, как координаты главного максимума, ширина основного лепестка, уровни боковых лепестков и т.д.) [1-2]. Во-вторых, в каждой точке наблюдения с фиксированными координатами, в дополнение к неискаженным ошибками ДН, появляется возможность исследовать гистограммы случайных уровней ЭМП, найденные, например, методом статистического имитационного моделирования (СИМ), которые отражают влияние на направленность АФУ ошибок любого заданного вида – как порознь, так и совместно [3].

Коэффициенты направленного действия и усиления в СТА также сохраняют прежний смысл, если характеризуют отличия реального АФУ (с учетом наличия ошибок) от эталонного образца, в котором ошибки отсутствуют. Это же относится к таким параметрам, как действующие длина и площадь поверхности, поскольку они характеризуют сравнительную эффективность АФУ и его эталона (который может быть задан в виде физической, математической, электродинамической модели) по критерию уровня ЭМП. Однако никакой новой информации о свойствах АФУ, по сравнению с гистограммами уровней ЭМП, гистограммы случайных значений указанных параметров не несут.

Гистограммы входного сопротивления [4], являющиеся результатом решения внутренней задачи СТА, представляют интерес при формировании исходных данных для решения внешней

задачи в части моделирования случайных ошибок [5-6]. Кроме того, найденные расчетно-экспериментальным путем, они могут содержать информацию о характере влияния окружающей среды (местных предметов) на согласование АФУ. По сравнению с традиционной теорией антенн возможности СТА в этом отношении представляются более широкими. То же относится к таким параметрам, как мощности излучения и потерь, коэффициент полезного действия, а также энергетический потенциал активного АФУ [3].

Цель настоящей статьи – анализ отличий методов и средств теории СА от близких ей по области применения разделов радиотехники и компьютерной техники: классической теории АФУ и СТА; теории рассеяния радиоволн на шероховатой поверхности; компьютерного имитационного моделирования и т.п.

### **Теория СА как развитие СТА: переход от случайных ошибок к неопределенности знаний**

Главным отличием теории 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» [6] применительно к исходным данным (знаниям об СА), необходимым для их исследования. Вопрос об этих ошибках и неопределенностях может быть поставлен следующим образом [7]: пусть система из  $N$  сосредоточенных излучателей создает в точке наблюдения  $M$  напряженность поля  $E_M$  и мы считаем, что располагаем информацией, которой достаточно для применения формулы

$$E_M = \sum_{n=1}^N E_n(A + \Delta A; \varphi + \Delta \varphi; R + \Delta R; t + \Delta t), \quad (1)$$

где  $A$  и  $\Delta A$  – соответственно, регулярная и стохастическая составляющие амплитуды сигнала, возбуждающего  $n$ -ый излучатель;  $\varphi$  и  $\Delta \varphi$  – аналогичные составляющие фазы сигнала, если он является гармоническим;  $R$  и  $\Delta R$  – составляющие трехмерной пространственной координаты  $n$ -го излучателя;  $t$  и  $\Delta t$  – составляющие модельного времени, используемого при расчетах. Указанные стохастические составляющие именуются в СТА случайными ошибками – соответственно, амплитудными, фазовыми, геометрическими и временными.

Однако неопределенными в (1), строго говоря, являются также и число элементов антенны  $N$ , и

сам факт суммирования  $E_n$  по  $n$ , и даже наличие в природе перечисленных регулярных составляющих и ошибок – особенно если мы не уверены, что располагаем достоверной информацией о конструкции антенны и режиме ее работы, как это имеет место при исследовании СА. Поэтому критериями для оценки обобщенной величины

$$X = X_0 + \Delta X, \quad (2)$$

моделирующей ошибки всех типов в (1), могут быть абсолютное  $\Delta X$  и относительное  $\Delta X / X_0$  значения присущей ей неопределенности. На первоначальных этапах в СТА принималось  $\Delta X / X_0 \ll 1$ , затем  $\Delta X / X_0 \approx 1$ , но структура (2) оставалась прежней.

Поскольку сегодня СТА обратилась к изучению СА, приходится решать, что делать: исследовать случай  $\Delta X / X_0 \gg 1$  или модифицировать всю схему (2), отказавшись от выделения в составе  $X$  квазидетерминированной регулярной части  $X_0$ .

Последний вариант представляется не только более радикальным, но и лучшим образом соответствующим природе СА и, что не менее важно, – онтологическим принципам современной теории вероятностей (ТВ) [8]. Рассматривая (1) как результат обобщенного суммирования случайных составляющих  $E_n$ , мы приходим к задаче анализа последовательностей случайных сумм  $E_M$  в условиях применимости центральной предельной теоремы ТВ – в ее традиционном и обобщенном виде [9].

Напомним, что в первом случае решение данной задачи приводит к предельному распределению для  $E_M$  в виде нормального закона, во втором случае – к семейству одномерных устойчивых распределений [8-10], обобщающему нормальный закон. Поэтому наиболее вероятной моделью неопределенности, которую современная ТВ может предложить теории СА, является устойчивый закон [6-7]. При неуверенности в условиях применимости предельных теорем ТВ, а также в отсутствие информации о свойствах неопределенностей в (1) можно руководствоваться «принципом безразличия» и считать их распределенными по равномерному закону [11-12].

Отметим также, что возможности статистического имитационного моделирования (СИМ) по версии метода Димова-Маслова (МДМ) [13] позволяют строить как статические модели, которые сегодня нашли применение при исследовании СА [3; 14-15 и др.], так и динамические – поиск приложения которых в СТА представляется актуальным.

## Рассеяние радиоволн на шероховатой поверхности и теория СА

Субъективность понятия неопределенности была отмечена Дж. Кейнсом [16] еще в 1937 г. «Под неопределенностью мы не имеем научного основания, которое могло бы помочь нам сформулировать идею измерения вероятности. Мы просто не знаем. Однако потребность действовать и принимать решения заставляет нас, как практических людей, игнорировать этот неудобный факт и вести себя так, как если бы мы имели хороший утилитарный способ вычисления значений предполагаемых преимуществ и недостатков – каждое из которых умножено на соответствующие ожидаемые вероятности, которые только и ждут, чтобы их просуммировали».

В то же время неопределенность не означает отсутствие информации как таковой: речь идет о неполноте, неточности и неадекватности тех или иных конкретных знаний упомянутых «практических людей». Механизм уменьшения неопределенностей зависит от ряда факторов: таких как методики сбора и обработки исходных данных, выбор способов представления и критериев оценки результатов моделирования, форм их последующего применения и т.п. Причем главным препятствием являются объективные исходные трудности: «чрезвычайно сложно собрать обширную информацию, состоящую из многочисленных серий однородных данных... Приписывать неопределенным по самой своей сути величинам какую-то особую точность бесполезно, применение точных формул к этим слишком неточно определяемым величинам есть не что иное, как обман и пустая трата времени» [17].

Специфику традиционных способов уменьшения неопределенностей покажем на примере задачи о рассеянии радиоволн на статистически неровной (шероховатой по терминологии [18-19]) поверхности, решение которой доведено до практического применения в [20]. Структурирование этой задачи имеет в виду три этапа:

- формализацию способа возбуждения внешним электромагнитным полем (ЭМП) поверхности  $S_A$ , о которой идет речь;
- статистическое моделирование неровного рельефа поверхности  $S_A$ ;
- определение структуры ЭМП, рассеянно-го поверхностью  $S_A$ , в рамках решения внешней электродинамической задачи с использованием принципа Гюйгенса-Кирхгофа.

Каждый из этих этапов непосредственно связан с преодолением неопределенностей, которые

в [20], по аналогии с [18-19], преодолеваются следующим образом:

- принимается, что поверхность  $S_A$  возбуждается ЭМП падающей плоской волны, источник расположен достаточно далеко от нее, а неравномерность возбуждения соответствует двумерной гауссовской кривой с максимумом ЭМП в условном центре зоны облучения;
- считается, что статистический рельеф  $S_A$  соответствует нормальному закону распределения при гауссовской или экспоненциальной модели корреляционной зависимости для неровностей, отвечающих критерию Релея и приближению Кирхгофа (длина плоской волны много меньше радиуса корреляции поверхности  $S_A$ );
- геометрия внешней задачи принимается соответствующей рис. 1, где  $P_{\text{пад}}$ ,  $P_{\text{отр}}$  и  $P_{\text{рас}}$  – значения уровней плотности потока мощности (модули вектора Пойнтинга), соответственно, для падающей, зеркально отраженной волн и компоненты углового спектра рассеянных поверхностью  $S_A$  волн;
- результатом аналитического решения внешней задачи являются значения среднего уровня и среднего квадрата уровня напряженности ЭМП, рассеянного неровной поверхностью (см.  $P_{\text{отр}}$  и  $P_{\text{рас}}$  на рис. 1) на расстоянии от  $S_A$ , соответствующем дальней зоне (Фраунгофера) волнового ЭМП.

Перечисленные допущения корректны ввиду того, что в [20] исследуется рассеяние радиоволн декаметрового диапазона (длины волн 10 ... 100 м) неровностями Земли на трассах протяженностью 1000 ... 4000 км. В ситуациях, соответствующих условиям работы СА, они неприемлемы.

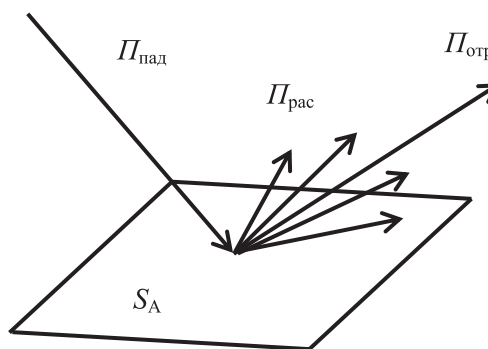


Рис. 1. Лучевая модель рассеяния плоской волны на шероховатой поверхности  $S_A$

В подтверждение этого вернемся к упомянутым трем этапам решения задачи о рассеивающих свойствах поверхности  $S_A$ , аналогом которой, на первый взгляд, может быть прямоугольная апер-

турная СА (далее АСА). Первый этап из сопоставления выпадает полностью, поскольку условия возбуждения АСА являются существенно более сложными и трудноформализуемыми [3; 5; 11-12; 21-22]. На соответствующей АСА поверхности  $S_A$  необходимо задавать (оценив их расчетно-экспериментальным или иным путем) три ортогональные составляющие (ОС) напряженности электрической  $E$ -составляющей и три ОС магнитной  $H$ -составляющей ЭМП, которое возбуждает АСА. Представлять их в виде плоской волны, соответствующей  $P_{\text{пад}}$  на рис. 1, оснований нет.

Второй этап не имеет практического смысла – поскольку излучающая поверхность АСА не является статистически неровной, а промоделировать ее реальную структуру (например, для АСА в виде окна, защищенного фигурной декоративной решеткой) ни возможности, ни необходимости нет. В свете изложенного отпадает и третий этап, предусматривающий аналитическое решение внешней задачи – во-первых, потому что он базируется на выполнении первых двух этапов, во-вторых, потому что доведение соотношений [18-19] до практически приемлемого уровня по аналогии с [20] в данном случае невозможно.

Поэтому необходимо использовать другие способы уменьшения неопределенностей – связанные, например, с применением СИМ по МДМ [13] в сочетании с вербальным и математическим моделированием при использовании принципа Гюйгенса-Кирхгофа.

### Гибридные СИМ-модели по МДМ для исследования СА

Метод СИМ является в настоящее время одним из самых универсальных и эффективных средств исследования сложных систем (СС): математики используют его при проведении компьютерных экспериментов, призванных проверить и подтвердить аналитические выкладки. Прикладные специалисты видят в нем средство решения задач, не решаемых другими способами. Системные аналитики применяют СИМ, когда объем знаний об иерархии компонентов (подсистем и элементов) СС существенно меньше знаний о них. Менеджеры заинтересованы в управлении бизнес-процессами с помощью СИМ. Предложение использовать СИМ по МДМ при исследовании СА отвечает этой тенденции в полной мере.

С точки зрения системного анализа, СИМ по МДМ является открытой СС – поскольку допускает совместное применение методов и средств любого моделирования: мысленного, вербального, физического, математического и т.д. [24].

В частности, методика СИМ по МДМ предусматривает разработку математических моделей (ММ) элементов СИМ-модели, без которых дальнейшее моделирование невозможно [3]. Строго говоря, СИМ-модели всегда являются гибридными – при исследовании АСА в рамках вероятностно-теоретического подхода [6-7] это иллюстрируется применением вербальных моделей для описания предметной области СИМ и ММ для определения характеристик АСА с помощью технологии Монте-Карло [11-12].

Идеология СИМ, однако, предъявляет несколько необычные и противоречивые требования к ММ: с одной стороны, они должны быть достаточно корректными и адекватными, с другой стороны – максимально простыми и «прозрачными» для удобства применения и объяснения получаемых результатов. Поэтому как Левша косоглазый умолял государя императора запретить чистить ружья толченым кирпичом, так специалисты СИМ убеждают теоретиков не идти по пути доказательства теорем и лемм, необходимых для доказательства других теорем и лемм, исследовать разрывы и экстремумы комплексных функций, условия на бесконечности, состав борелевских множеств и т.п. [28] – поскольку эти элементы СС целиком принадлежат виртуальной среде и не имеют аналогов в среде реальных объектов (неприменимы для исследования и управления СС) [21]. В то же время однозначных предписаний о том, на каком уровне абстрагирования и сложности ММ следует останавливаться, специалисты СИМ не дают – рекомендуя решать этот вопрос в индивидуальном порядке.

Объяснение данному факту дает теория СС – согласно которой на верхних стратах их изучения преобладают абстрактное описание и моделирование сущностей, тогда как по мере понижения уровня страт происходит переход к более конкретным показателям, вплоть до натуральных параметров на самом нижнем – элементарном уровне [27]. Поэтому можно говорить о том, что наиболее строгие и сложные ММ относятся к верхним стратам анализа СА, тогда как упрощенные ММ – к нижним стратам (СИМ по МДМ в этой иерархии находится где-то посередине, осуществляя удобную и эффективную взаимосвязь между ними). Можно также предположить, что совершенно оторванные, на первый взгляд, от реалий жизни и самые абстрактные ММ просто отражают некие неизвестные нам пока что явления и процессы – происходящие за гранью нашего познания и понимания окружающей действительности.

Однако формулировка и определение исходных данных в ММ-задачах все же уводят подчас так далеко от исследуемых объектов, что ценность полученных в итоге – безупречных в математическом отношении – решений бывает невелика. В то же время взаимодействие специалистов на уровне самых простых и понятных им вербальных моделей и ММ оказывается достаточно эффективным – особенно при одинаковом толковании употребляемых ими (иногда весьма своеобразных по форме выражения, на жаргоне и сленге) терминов.

Сегодня здесь имеют место несколько тенденций. Широкое применение ЭВМ в виртуальной среде стимулирует, во-первых, интенсивное развитие способов структурирования и формализации задач, присущих реальной среде, для их адекватного перевода в среду виртуальную [3]. Во-вторых, использование приближенных, численных, квазидетерминированных и т.п. ММ позволяет получать решения с приемлемым уровнем адекватности, «прозрачные» и комфортные для специалистов СИМ. В-третьих, строгие математические методы, логичные и лишённые внутренних противоречий, адаптируются для тестирования разработанных компьютерных СИМ-моделей, которые сами являются СС. В-четвертых, совершенствование программного обеспечения ЭВМ позволяет эффективно общаться с компьютером разработчикам СИМ-моделей, обладающим минимальным стандартным уровнем математических знаний.

Адаптация ММ, а также других методов и средств моделирования к СИМ, однако, должна быть креативной – в качестве примера укажем на кластерный метод учета корреляционных связей между ошибками, реализованный при исследовании СА. Традиционные для СТА и других приложений (см. предыдущий раздел) гауссовская и экспоненциальная модели корреляционной взаимной зависимости случайных ошибок являются аналитическими и могут быть использованы только в СИМ-моделях малоэлементных дискретных СА [25].

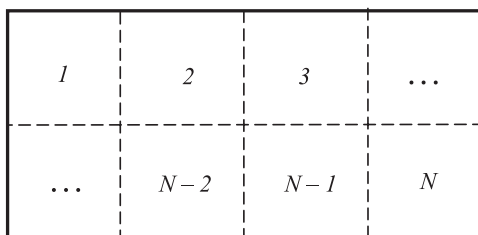


Рис. 2. Кластерный метод учета корреляционных связей между ошибками в АСА

Поэтому для многоэлементных СА, включая АСА, был предложен кластерный метод учета корреляции ошибок [7; 11-12] – принцип которого поясняет упрощенная схема на рис. 2. Прямоугольная площадь АСА разделяется на  $N$  одинаковых кластеров, в пределах каждого из которых ошибки возбуждения СА считаются одними и теми же. Ошибки в соседних и других кластерах предполагаются взаимно независимыми (некоррелированными). Нетрудно проверить, что увеличение радиуса корреляции ошибок при использовании традиционных аналитических (гауссовской и экспоненциальной) моделей в этом случае соответствует уменьшению числа кластеров, тогда как уменьшение радиусов корреляции – напротив, эквивалентно увеличению  $N$ . Горизонтальный и вертикальный размеры отдельного кластера при этом можно трактовать как эффективные значения радиуса пространственной корреляции вдоль соответствующей оси.

### Особенности вербального и эвристического моделирования СА

В настоящее время вербальные и эвристические методы моделирования СА могут быть реализованы на качественно новом уровне – при поддержке действий специалистов СИМ в рамках технологии автоматизированных рабочих мест. Но даже простой обмен мнениями между ними – с применением приближенных ММ, а также физических и вербальных моделей, представляет интерес при проведении СИМ. В качестве примера рассмотрим онтологическую модель ситуации (ОМС) [26], которая была сформирована экспертным путем и согласована по методу Дельфи [27] при исследовании АСА, показанной на рис. 3. Назначение СИМ-модели – проектирование системы активной защиты (САЗ) конфиденциальной информации от утечки через СА [3; 14-15].

Рассматриваемая АСА представляет собой прямоугольное отверстие с размерами  $l \times h$  на проводящей поверхности  $S_A$ , центр которого совмещен с началом системы прямоугольных координат  $X; Y; Z$ . Эту апертуру возбуждает источник, расположенный в точке с координатами  $M_0(Y_0; Z_0)$ , и нам необходимо найти напряженность поля  $E_M$  в точке наблюдения  $M_S$  на поверхности  $S_M$ , удаленной на расстояние  $R_A$  от поверхности  $S_A$  таким образом, что расстояние от произвольной точки  $M_A$  на поверхности  $S_A$  до точки  $M_S$  на поверхности  $S_M$  составляет  $r_A$ .

1. Задача определения уровней ЭМП в точке  $M_S$  в соответствии с принципом Гюйгенса-Кирхгофа может быть разделена на две части: вну-

трения задача СТА о возбуждении поверхности сторонними источниками, распределенными в объеме пространства вокруг точки  $M_0$ ; и внешняя задача СТА о расчете уровней электрической  $E$ -составляющей и магнитной  $H$ -составляющей ЭМП в точке  $M_S$  на заданной поверхности  $S_M$ .

2. Внутреннюю задачу СТА отличает неопределенность исходных условий, которая не дает возможности убедительно описать источники на  $S_A$  ни в детерминированном, ни в стохастическом виде: мы действительно «просто не знаем», но как «практические люди» предполагаем, что в рамках метода СИМ неравномерное по интенсивности и временным сдвигам возбуждение  $S_A$  можно задать путем введения амплитудных и временных ошибок, а режим работы АСА – считать гармоническим с круговой частотой  $\omega$ .

3. Также в рамках метода СИМ, который требует применения максимально простых и «прозрачных» ММ, будем считать, что временные ошибки (в гармоническом режиме – это фазовые ошибки) можно определить с помощью метода геометрической оптики, рассматривая набеги по фазе лучей, приходящих в точки поверхности  $S_A$  от разных точек  $M_0$  внутри подлежащего защите помещения (ПЗП), в пределах которого распределены сторонние источники ЭМП (ЭВМ, аппаратура связи, информационное оборудование и т.п.).

4. Неравномерность возбуждения АСА по интенсивности ЭМП определяется двумя факторами: затенением  $S_A$  элементами инфраструктуры

(оборудование, персонал, мебель) и ЭМП стоячей волны, возникающей в ПЗП, поэтому амплитудные ошибки, которые также зависят от частоты, могут быть существенными в пределах  $\Delta A(\omega)$  [0; 1]. Аналогичным образом фазовые ошибки  $\Delta\varphi(\omega)$  [0;  $\Delta\varphi_{MAX}$ ], причем с ростом  $\omega$  значение  $\Delta\varphi_{MAX} = \pm 180^\circ$ .

5. Уточнить значения  $\Delta A(\omega_n)$  на конкретных частотах  $\omega_n$  можно с помощью натурного моделирования – путем проведения эксперимента в ПЗП, однако определить значения  $\Delta\varphi(\omega_n)$  аналогичным образом нельзя. Поэтому разработчику СИМ-модели следует, располагая сведениями о размерах ПЗП и местах расположения сторонних источников ЭМП с частотой  $\omega_n$ , оценить возможные набеги по фазе  $\Delta\varphi(\omega_n)$  для разных точек АСА, размещенной на поверхности  $S_A$ , чтобы ограничиться этим при проведении СИМ.

6. Дискретизированные энергетические спектры сигнала  $G_C(\omega_n)$  и помехи  $G_{II}(\omega_n)$ , где  $n$  [1;  $M$ ], дают возможность определить частотную характеристику критерия эффективности САЗ СА – отношения «помеха/сигнал»  $\chi(\omega_n) = G_{II}(\omega_n) / G_C(\omega_n)$ , чтобы сравнить полученные значения с нормативом  $\chi_0$ : при всех  $\chi(\omega_n) \geq \chi_0$  эффективность САЗ СА считается соответствующей нормативным требованиям, в противном случае – не соответствующей.

7. На каждой частоте  $\omega_n$  уровни  $G_C(\omega_n)$  и определяются в одинаковых условиях и по одной и той же методике [11], поэтому достоверность и точность полученных относительных значений

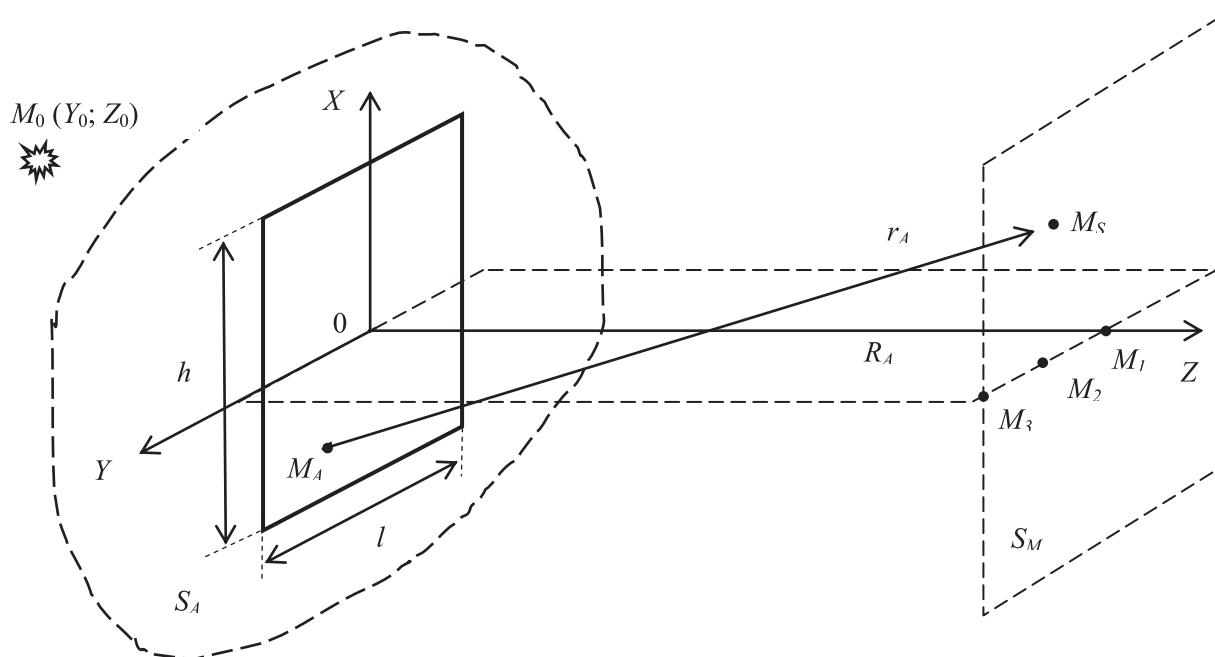


Рис. 3. Расположение АСА в декартовой системе координат и схема лабораторного эксперимента [12; 22]

$\chi(\omega_n)$  будет существенно выше, чем у абсолютных исходных данных, найденных с оговоренной неопределенностью, – таким образом, замена в рамках ОМС верифицированных знаний о параметрах и условиях работы элементов САЗ аксиологическими знаниями специалистов СИМ способствует достижению поставленной цели: анализу эффективности каждого рассматриваемого варианта реализации САЗ СА.

8. После оценки с помощью методов сценариев и функционально-стоимостного анализа всех возможных вариантов реализации САЗ осуществляется выбор наилучшего из них – с учетом субъективных мнений и предпочтений специалистов, а также на основании объективных данных, полученных методом СИМ, что обеспечивает комплексное решение поставленной задачи: проектирование САЗ СА с требуемыми характеристиками эффективности.

Приведенный пример демонстрирует возможности эвристического подхода к проведению СИМ по МДМ совместно с другими методами моделирования СА.

### **СИМ по МДМ и технология ММК**

Кратко остановимся на отличиях СИМ от ММК, который известен с 1949 г., когда Н. Метрополис и С. Улам впервые изложили его сущность [23]. Название метода связано, как известно, с игрой в рулетку, которая, с точки зрения теории СИМ, является простейшим устройством для разыгрывания (получения последовательностей) случайных чисел (СЧ), на использовании которых базируется ММК. С развитием компьютерных технологий была удобно для пользователей решена задача разыгрывания так называемых псевдослучайных чисел, – которые при проведении СИМ используются как СЧ (отметим, что в [3-5; 11-12 и др.] используется более совершенная процедура разыгрывания СЧ).

Этим обстоятельством во многом обусловлено нынешнее широкое применение метода СИМ в качестве универсальной и эффективной информационной технологии – обычно в интересах исследования наиболее сложных (технических, экономических, экологических и т.п.) СС – с учетом непредсказуемых (случайных) факторов, обычно отрицательно влияющих на эффективность их функционирования.

Поскольку ММК требует проведения большого числа испытаний, его часто называют методом статистических испытаний, а так как в настоящее время эти испытания обычно проводятся с применением ЭВМ, – еще и методом статистическо-

го компьютерного моделирования (который следует отличать от метода СИМ).

Методика СИМ предусматривает последовательное проведение следующих действий.

Этап 1. Определение состава исходных данных (детерминированных и случайных, входных, внутренних и внешних), оказывающих влияние на процесс функционирования СС как объекта СИМ; а также выходных характеристик (результатов СИМ) и критериев для оценки путем анализа этих характеристик (результатов) эффективности функционирования СС.

Этап 2. Проведение комплексного (в том числе статистического) исследования СС, которое включает сбор и обработку информации о ней с целью выявления законов распределения исходных данных, – при этом реальные данные могут быть использованы как для определения используемых теоретических законов, так и для получения эмпирических распределений, из которых можно выбрать исходные данные, необходимые для моделирования СС.

Этап 3. Идентификация типов законов распределения исходных данных и расчет статистических оценок параметров этих законов – обычно с применением пакетов программ прикладной статистики, которые обеспечивают работу в диалоговом режиме без специальной подготовки пользователей.

Этап 4. Разработка ММ, которая производится сначала для каждого блока СС, а затем для СС в целом, – с последующим программированием данной модели на ЭВМ и разработкой плана компьютерного эксперимента для имитации процесса функционирования СС.

Этап 5. Имитация процесса функционирования СС на модели, реализованной в виде пакета прикладных программ, производимая в диалоговом режиме, с возможностью вывода и проверки после каждого цикла моделирования промежуточных данных, необходимых для формирования результатов СИМ.

Этап 6. Завершение эксперимента при достижении заданной доверительной вероятности (надежности) или заданного числа реализаций СИМ-модели – с выводом на печать результатов СИМ, представляющих собой массивы выходных расчетных данных, которые обычно подлежат статистической обработке для удобства последующей интерпретации пользователем.

Мы видим, что идеология СИМ (как в общем виде, так и в частном случае: при использовании версии МДМ) гораздо шире идеи использовать ММК в его современном компьютерном вариан-

те. Уникальным достоинством метода СИМ при исследовании СА [3] представляется возможность воспроизводить поведение СС путем реализации динамических моделей: например, для анализа поляризационных эффектов, сопровождающих процесс излучения АСА, а также игры с противоположными интересами при моделировании систем защиты информации [14-15].

### Заключение

Рассмотренные в статье отличия от теории АФУ и СТА, а также от других близких разделов теоретической радиотехники и теории компьютерного моделирования позволяют считать теорию СА одним из направлений развития СТА – в необходимой и достаточной мере самостоятельным, а также актуальным по области применения. Наряду с традиционными методами и средствами моделирования: математического, физического, эвристического, вербального и т.п. основным инструментом теории СА является компьютерное имитационное моделирование – в виде СИМ по МДМ с использованием компьютерной технологии ММК.

Самостоятельный интерес представляет проблема преодоления неопределенности знаний об СА с помощью СИМ по МДМ [13]. Наиболее очевидный практический выход результатов теории СА в настоящее время связан с разработкой низкоэнергетических систем активной защиты конфиденциальной информации. Автор выражает признательность участникам Международной конференции «Параллельная компьютерная алгебра и ее приложения в новых инфокоммуникационных системах» (Северо-Кавказский Федеральный университет, г. Ставрополь, октябрь, 2014) за обсуждение тематики данной статьи.

### Литература

1. Кочержевский Г.Н. Антенно-фидерные устройства. М.: Связь, 1972. – 472 с.
2. Шифрин Я.С. Современное состояние статистической теории антенн // Радиотехника и электроника. 1990. Т.35. №7. – С.1345-1365.
3. Маслов О.Н. Случайные антенны (теория и практика). Самара: Изд-во ПГУТИ-ОФОРТ, 2013. – 480 с.
4. Маслов О.Н. Статистические характеристики малогабаритной резонансной антенны СТА // Антенны. №9, 2011. – С. 62-71.
5. Маслов О.Н. Возможности и перспективы применения метода СИМ при решении внутренних задач СТА // ИКТ. Т.8, №2, 2010. – С. 8-22.
6. Маслов О.Н. Моделирование неопределенностей // Нейрокомпьютеры: разработка, применение. №9, 2014. – С. 79-84.
7. 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.
8. Золотарев В.М. Современная теория суммирования независимых случайных величин. М.: Наука, 1986. – 416 с.
9. Учайкин В.В. Метод дробных производных. Ульяновск: Изд. «Артишок», 2008. – 512 с.
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., Силкин А.А. Статистические характеристики поля решетки апертурных случайных антенн // Радиотехника и электроника. Т.58, №11, 2013. – С. 1093-1101.
12. Красильникова Е.П., Маслов О.Н., Раков А.С. Моделирование статистических характеристик электромагнитного поля апертурной случайной антенны // ИКТ. Т.12, №2, 2014. – С. 78-86.
13. Димов Э.М., Маслов О.Н., Трошин Ю.В. Снижение неопределенности выбора управленческих решений с помощью метода статистического имитационного моделирования // Информационные технологии. №6 (214), 2014. – С. 51-57.
14. 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.
15. 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.
16. Кейнс Дж. Общая теория занятости, процента и денег. Пер. с англ. М.: Гелиос АРВ, 2002. – 352 с.
17. Винер Н. Творец и робот. Пер. с англ. М.: Прогресс, 1996. – 104 с.
18. Beckmann P., Spizzichino A. The scattering of electromagnetic waves from rough surfaces. N-Y., Pergamon Press, 1963. – 503 p.
19. Басс Ф.Г., Фукс И.М. Рассеяние волн на статистически неровной поверхности. М.: Наука, 1972. – 424 с.



20. Чернов Ю.А. Возвратно-наклонное зондирование ионосферы. М.: Связь, 1971. – 204 с.
21. Альшев 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.
22. Маслов О.Н., Раков А.С., Силкин А.А. Моделирование условий возбуждения апертурной случайной антенны // ИКТ. Т.11, №4, 2013. – С. 96-101.
23. Metropolis N., Ulam S. The Monte Carlo Method // Journal of the American Statistical Association. V.44, 247 (sep. 1949). – P. 335-341.
24. Павловский Ю.Н. Имитационные модели и системы. М.: Фазис: ВЦ РАН, 2000. – 134 с.
25. Маслов О.Н., Раков А.С. Направленные свойства линейной случайной антенны с учетом корреляционной связи между ошибками // Антенны. №3, 2010. – С. 54-62.
26. Виттих В.А. Организация сложных систем. Самара: Изд. СНЦ РАН, 2010. – 66 с.
27. Маслов О.Н. Безопасность корпорации: моделирование и прогнозирование внутренних угроз методом риска. Самара: Изд-во ПГУТИ-АЭРОПРИНТ, 2013. – 170 с.
28. Королев В.Ю., Бенинг В.Е., Шоргин С.Я. Математические основы теории риска. М.: Физматлит, 2007. – 544 с.

## THE RANDOM ANTENNA THEORY: ATTRIBUTES AND DISTINGUISHING FEATURES

Maslov O.N.

**The difference of methods and tools of the random antennas theory from the fields of theoretical radiotechnics and computer simulation which are close to her are discussed in the article.**

**Keywords:** *random antenna theory, statistical antenna theory, knowledge uncertainty, computer simulation, Monte Carlo method, scattering theory, statistically uneven surfaces.*

Маслов Олег Николаевич, д.т.н., профессор, заведующий Кафедрой экономических и информационных систем Поволжского государственного университета телекоммуникаций и информатики. Тел. 8-902-371-06-24. E-mail: maslov@psati.ru

## ТЕХНОЛОГИИ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ

УДК 519.872.6

### ИНЖЕНЕРНАЯ МЕТОДИКА ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА СИСТЕМЫ МАССОВОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ $M/M/n/q$ С НЕНАДЕЖНЫМИ КАНАЛАМИ И ЕЕ ПРИЛОЖЕНИЕ ДЛЯ АНАЛИЗА ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СИСТЕМ МНОГОКАНАЛЬНОЙ СВЯЗИ В УСЛОВИЯХ ПОМЕХ

Макаренко С.И., Синицын И.А.

Предложена сравнительно простая методика расчета и оценки показателей качества обслуживания для системы массового обслуживания  $M/M/n/q$  с ненадежными обслуживающими каналами. Показаны варианты приложения данной методики к исследованию процессов функционирования многоканальных систем связи в условиях воздействия помех.

**Ключевые слова:** многоканальная система связи, система массового обслуживания, радиоэлектронное подавление, помехозащищенность.

#### Введение

Современные телекоммуникационные системы (ТКС) интегрируют в себя многоканальные системы связи (СС) на основе различных физических сред. При этом именно СС радиосвязи являются наиболее уязвимыми элементами ТКС в плане помехозащищенности. Продолжая и развивая направление работ [1-3], в данной статье авторами предлагается методика расчета систем