

$$-\lambda_m M \Delta T_{\text{реш } 2}^2 \int_0^{T(V_{\text{ност}})} P_{\text{ИП}}(T(V_{\text{ност}}) - \Delta T_{\text{реш } 2}) e^{-\Delta T_{\text{реш } 2} M \Delta T_{\text{реш } 2}} d\Psi_2(\Delta T_{\text{реш } 2}).$$

Заметим, что правая часть уравнения (П2.1), умноженная на $(M \Delta T_{\text{реш } 1} \times M \Delta T_{\text{реш } 2})$, в сумме с правой частью уравнения (П2.2), умноженной на $(M \Delta T_{\text{реш } 1} - M \Delta T_{\text{реш } 2})$, дает правую часть уравнения (П2.3). Для левых частей получим уравнение

$$P_{\text{ИП}}'' = \frac{\lambda_m M \Delta T_{\text{реш } 1} - \lambda_n M \Delta T_{\text{реш } 2}}{\lambda_m + \lambda_n} P_{\text{ИП}}'.$$

Отсюда $P_{\text{ИП}} = C_1 + C_2 e^{-\frac{\lambda_n M \Delta T_{\text{реш } 1} - \lambda_m M \Delta T_{\text{реш } 2}}{(\lambda_n + \lambda_m) M \Delta T_{\text{реш } 1} M \Delta T_{\text{реш } 2}} T(V_{\text{ност}})}$, где константа $C_1 = P_{\text{ИП}}(\infty) = 1$. Константа C_2 находится из уравнения $(\lambda_n + \lambda_m) P_{\text{ИП}}(0) = \lambda_n \int_0^\infty P_{\text{ИП}}(\Delta T_{\text{реш } 1}) e^{-\Delta T_{\text{реш } 1} M \Delta T_{\text{реш } 1}} d\Psi_1(\Delta T_{\text{реш } 1})$. Отсюда следует $C_2 = -\frac{\lambda_m (M \Delta T_{\text{реш } 1} + M \Delta T_{\text{реш } 2})}{M \Delta T_{\text{реш } 1} (\lambda_n + \lambda_m)}$.

В итоге получаем $P_{\text{ИП}} = 1 - \frac{\lambda_m (M \Delta T_{\text{реш } 1} + M \Delta T_{\text{реш } 2})}{M \Delta T_{\text{реш } 1} (\lambda_n + \lambda_m)} e^{-\frac{\lambda_n M \Delta T_{\text{реш } 1} - \lambda_m M \Delta T_{\text{реш } 2}}{(\lambda_n + \lambda_m) M \Delta T_{\text{реш } 1} M \Delta T_{\text{реш } 2}} T(V_{\text{ност}})}$. Теорема 2 доказана.

УДК 621.396.677; 621.397.671

ОНТОЛОГИЧЕСКИЕ ПРИНЦИПЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ РАСПРЕДЕЛЕННЫХ СЛУЧАЙНЫХ АНТЕНН

Добрынин С.С., Маслов О.Н., Шаталов И.С.

Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики

E-mail: maslov@psuti.ru

В статье рассматриваются онтологические основы моделирования распределенной случайной антенны (PCA) триадно-кластерным методом (ТКМ) с использованием базового элемента в виде триадного элементарного излучателя, а также принципов Лапласа и Гюйгенса – Кирхгофа. Рассмотрены особенности решения внутренних и внешних электродинамических задач, включая формулировку исходных условий и общие принципы определения характеристик PCA. Представлены ТКМ-модели, соответствующие частичной и полной неопределенности знаний лиц, принимающих решения (ЛПР) о конфигурации, условиях возбуждения и других свойствах PCA. Данные модели позволяют ЛПР понять и воспроизвести физические процессы, сопровождающие формирование каналов утечки конфиденциальной информации во внешнюю среду через PCA.

Ключевые слова: теория случайных антенн, распределенные случайные антенны, онтологическая модель ситуации, статистическое имитационное моделирование, триадно-кластерный метод, применение результатов моделирования

Введение

Согласно принятой в теории случайных антенн (TCA) классификации [1; 2], распределенные случайные антенны (PCA) входят в подраздел 3.1.2 в составе раздела 3 наряду с другими антеннами со случайными характеристиками. Применительно к области защиты конфиденциальной информации (КИ) в качестве PCA могут выступать любые системы преобразователей, излучателей и переизлучателей сигналов, создаваемых электромагнитным полем (ЭМП) исходного сигнала, содержащего КИ (далее – КИ-сигнала), распределенные в пространстве: офисное оборудование, элементы компьютерных сетей, соединительные линии (СЛ) – кабели, провода, трубы, токопроводящие конструкции зданий и т. д.

Каналам утечки КИ через PCA присущи следующие особенности:

- сложный и непредсказуемый характер возбуждения, зачастую связанный с преобразованием исходного КИ-сигнала в сигналы, расходящиеся по PCA;

- существенно разный характер распространения КИ-сигналов внутри офисного помещения и в PCA, которые «подключены» к внешнему общедоступному оборудованию, в результате чего они с малым затуханием могут уходить по СЛ далеко за пределы офиса и становиться несанкционированно доступными;

- возможность PCA на низких частотах выступать в роли единого элемента (источника или рецептора ЭМП) – в виде не только офисного по-

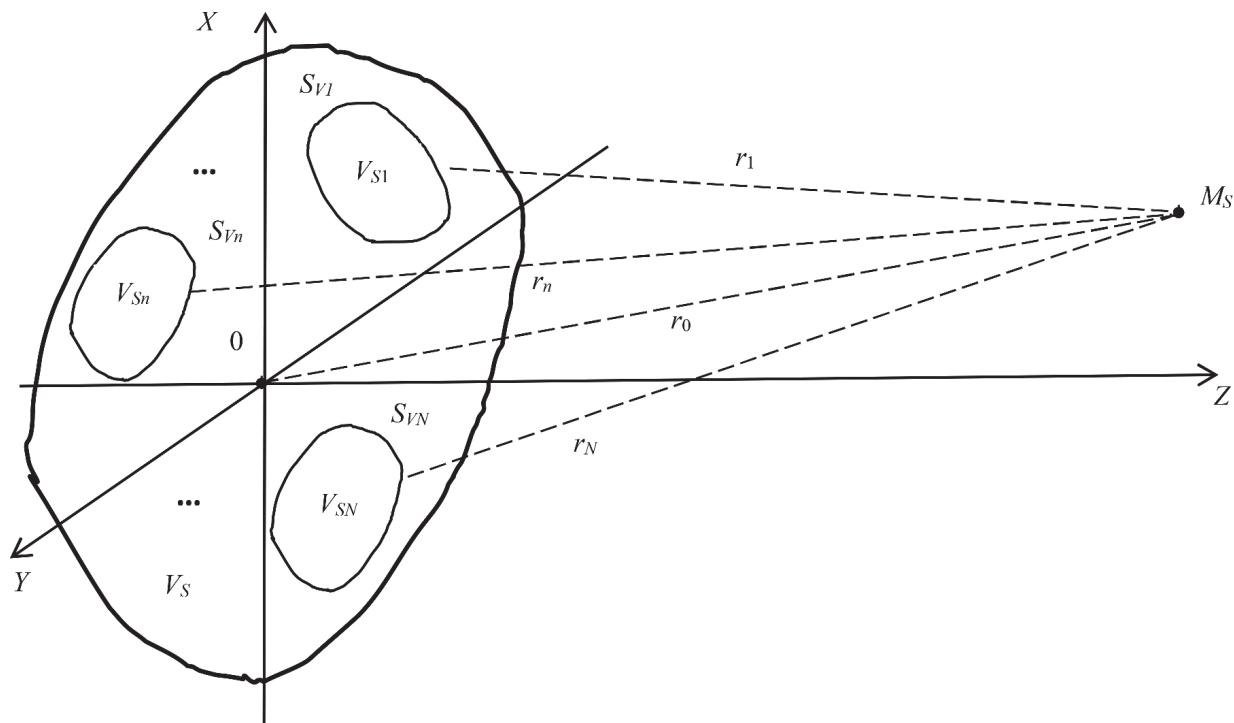


Рисунок 1. Первая ТКМ-модель РСА

мещения, где размещаются ее элементы, но и этажа, а также здания целиком;

- трудности моделирования (математического, физического, компьютерного) как источников КИ, возбуждающих РСА, так и непосредственно элементов РСА;

- побочные явления при защите КИ от утечки через РСА: ухудшение эколого-эргономической обстановки за счет теплового, шумового и электромагнитного загрязнения защищенного офиса, изменения влажности и состава воздуха без вентиляции и т. п. [3].

Анализ онтологической модели ситуации (ОМС) [4] показывает, что методы и средства пассивной некриптографической защиты (экранирование, заземление, организационные меры) неспособны обеспечить безопасность РСА – как с точки зрения «устранения» каналов утечки КИ, так и по другим причинам (конструктивным, организационно-техническим, экономическим) [5]. Это побуждает лиц, принимающих решения (ЛПР), использовать активную защиту КИ. Однако разработку систем активной защиты КИ существенно осложняет неопределенность знаний ЛПР об их конфигурации, условиях возбуждения и других функциональных особенностях [1–4; 6–8].

Цель статьи – моделирование РСА триадно-кластерным методом (ТКМ) [9; 10] с использованием в качестве базового элемента триадного элементарного излучателя (ТЭИ) [11–13] – способствует решению данной проблемы.

ОМС в условиях частичной неопределенности знаний ЛПР о конфигурации и свойствах РСА

Первый вариант рассматриваемой ОМС иллюстрирует рисунок 1. Здесь ЛПР обладает информацией о пространственном расположении элементов РСА: известно, что в объеме V_S офисного помещения они занимают объемы, соответствующие локальным взаимно не пересекающимся кластерам V_{Sn} , $n \in [1; N]$. Поэтому первой возможной ТКМ-моделью РСА в условиях неопределенности знаний ЛПР, которую условимся именовать частичной, является совокупность ТЭИ, размещенных в данных кластерах, а достоверность (точность и адекватность) результатов моделирования будет зависеть от того, насколько ЭМП этих виртуальных ТЭИ близки к ЭМП, соответствующим реальным элементам РСА.

Напомним, что ТЭИ состоит из двух триад: первая триада образована ортогональными элементарными электрическими излучателями ЭЭИ_{X;Y;Z}, вторая триада – аналогичными магнитными излучателями ЭМИ_{X;Y;Z} в системе декартовых координат [9; 10]. Действительные и мнимые компоненты указанных составляющих образуют 12 массивов расчетных данных, характеризующих свойства комплексных векторов E -поля и H -поля как отдельных ТЭИ, так и РСА в целом. Неопределенность знаний ЛПР о конструкции и режиме работы РСА моделируется путем комбинирования от 1 до 6 элементов ЭЭИ_{X;Y;Z} и ЭМИ_{X;Y;Z},

«включенных» случайным образом и возбужденных электрическими и магнитными токами со случайными амплитудами и направлениями. Это ведет к «разыгрыванию» по методу Монте-Карло $8 \times 8 - 1 = 63$ вариантов сочетаний ЭЭИ_{x,y,z} и ЭМИ_{x,y,z}, так как случай их одновременного отсутствия в составе ТКМ-модели исключается.

Чтобы найти токи, возбуждающие ТЭИ, аналогично [11–13] воспользуемся принципом Гюйгенса, согласно которому каждый элемент фронта волны, создаваемой совокупностью реальных источников ЭМП, считается виртуальным излучателем Гюйгенса. В нашем случае речь идет об ЭМП от источников, находящихся внутри поверхности S_{V_n} , ограничивающей объем кластера V_{S_n} , которое можно представить как сумму ЭМП, создаваемых в точке наблюдения M_s волнами, излучаемыми поверхностью S_{V_n} . Математическую формулировку принципа Гюйгенса в скалярном виде дал Кирхгоф, его обобщение для векторных величин, полученное Стрэттоном и Чу, позволяет найти векторы E - поля и H - поля в точке M_s по значениям этих векторов на поверхности S_{V_n} .

Методику анализа содержит [14]: векторы ЭМП в точке M_s определяются через виртуальные заряды и токи, электрические и магнитные, вводимые в соответствии с уравнениями Максвелла и принципом перестановочной двойственности на поверхности S_{V_n} . Для этого указанные векторы сначала выражают через тангенциальные составляющие векторов E - поля и H - поля на S_{V_n} , а затем по принципу эквивалентности – через поверхностные электрический \vec{j}_e и магнитный \vec{j}_M токи согласно $\vec{j}_e = [\vec{n}_0 \vec{H}]$; $\vec{j}_M = -[\vec{n}_0 \vec{E}]$, где \vec{n}_0 – единичная нормаль к поверхности S_{V_n} в точке, где заданы \vec{E} и \vec{H} . При этом токи \vec{j}_e и \vec{j}_M можно считать детерминированными только при достоверно известных \vec{n}_0 , \vec{E} и \vec{H} , а если этого нет, то в зависимости от условий задачи нужно либо зафиксировать \vec{n}_0 и считать случайными \vec{E} и \vec{H} , либо, что представляется более выгодным, определить \vec{E} и \vec{H} эвристическим, расчетным, экспериментальным и т. д. путем, чтобы считать случайным вектором \vec{n}_0 , как это сделано в [11–13].

Формируемую ОМС отличает еще одно важное обстоятельство. Так как в пределах локального участка волновой фронт любой формы является приближенно плоским, нормаль \vec{n}_0 к нему и тангенциальные составляющие \vec{E} ; \vec{H} в любой локальной системе пространственных координат образуют тройку векторов, которая описывает характер распространения волнового процесса и соответствует модели его элемента в виде из-

лучателя Гюйгенса [14]. Если же нормаль \vec{n}_0 – случайный вектор, а волновой фронт – случайная поверхность, то в любой независимой от них системе глобальных координат и векторы \vec{E} ; \vec{H} , и токи \vec{j}_e ; \vec{j}_M будут иметь три стохастические ортогональные составляющие (ОС): квазиперечные и квазипродольные, что подтверждают результаты экспериментальных измерений [13]. Тогда в качестве виртуальных вторичных источников ЭМП вместо излучателей Гюйгенса следует рассматривать ТЭИ с полным набором ОС: в декартовой системе координат это $E_{x,y,z}$; $H_{x,y,z}$, возбуждаемые токами $j_e^{x,y,z}$; $j_M^{x,y,z}$.

Таким образом, поставленная задача решается в два этапа: сначала определяются ОС $E_{x,y,z}$; $H_{x,y,z}$ и токи $j_e^{x,y,z}$; $j_M^{x,y,z}$, возбуждающие ТЭИ, а затем – статистические характеристики векторов E - поля и H - поля в точке M_s , что соответствует подходу Гюйгенса – Кирхгофа, но в обобщенном стохастическом виде. В тестовом частном случае, когда можно считать, что ЛПР известны сторонние токи в объеме кластеров, принцип Гюйгенса – Кирхгофа фиксирует равенство в точке наблюдения M_s двух ЭМП: первое создается совокупностью реальных источников КИ-сигнала, размещенных внутри всех V_{S_n} , второе – совокупностью излучателей Гюйгенса, размещенных на всех S_{V_n} . Первая ТКМ-модель РСА при этом имеет в виду только замену излучателей Гюйгенса на ТЭИ в соответствии с разработанной ОМС и [9; 10].

ОМС в условиях полной неопределенности знаний ЛПР о конфигурации и свойствах РСА

Рассмотрим второй (предельно негативный для ЛПР) случай, когда они не располагают информацией об источниках возбуждения РСА, которые могут быть размещены как внутри объема V_s , так и за его пределами. При этом ОМС предлагает в рамках ТКМ считать задачу решаемой хотя бы в первом приближении – с учетом возможности корректировки и уточнения другими методами первоначально полученных данных. Поскольку принцип Гюйгенса – Кирхгофа, подразумевающий наличие у ЛПР сведений о конфигурации V_{S_n} и S_{V_n} , в рассмотренном виде здесь не применим, он нуждается в дальнейшей модификации. В этой связи на основании принципа безразличия Лапласа предположим, что источники ЭМП могут с одинаковой вероятностью находиться в любых точках помещения, что соответствует полному разбиению объема V_s на объемы V_{S_n} (в рамках ТКМ это по-прежнему корреляционные кластеры), ограниченные поверхностями

S_{ν_n} – где нужно найти векторы E -поля и H -поля с тем, чтобы заменить их токами токи $\vec{j}_{\mathcal{E}n}$ и \vec{j}_{Mn} , а затем действовать, как в предыдущем случае.

Таким образом, в представленном модифицированном виде принцип Гюйгенса – Кирхгофа декларирует равенство в точке наблюдения M_s двух ЭМП: первое создается совокупностью реальных источников КИ-сигнала, размещенных в объеме V_s , второе – трехмерной решеткой виртуальных источников в виде ТЭИ, соответствующей разбиению объема V_s на кластеры V_{sn} . Первое ЭМП как объект изучения его структуры и динамических свойств фактически недоступно для ЛПР никакими другими способами, кроме эвристического и, возможно, экспериментального. Второе ЭМП, напротив, может быть исследовано объективными средствами ТСА: экспериментальными и статистическими методами, про-моделировано расчетно-вероятностным путем. В то же время второе ЭМП представляет собой реализацию первого исходного ЭМП и неотделимо от него, а на поверхности S_ν , ограничивающей объем V_s , у них априори одни и те же распределения векторов E -поля и H -поля. Поэтому можно утверждать, что соответствующие двум данным первичным полям ЭМП в точке наблюдения M_s будут одинаковы – если пренебречь ЭМП источников, попадающих в точку M_s помимо объема V_s .

Отметим, что приведенная ОМС жестко определяет ряд важных для применения ТКМ-моделей РСА субъективных моментов и ограничений. Первый из них связан с кластерным моделированием пространственной корреляции между стохастическими факторами (случайными ошибками), который был предложен для решения задач ТСА путем статистического имитационного моделирования [9]. Суть данного дискретного метода состоит в разделении излучающей части (апертуры) случайной антенны на кластеры, в пределах каждого из которых факторы считаются одинаковыми (полностью коррелированными друг с другом), тогда как за пределами кластеров – взаимно независимыми.

Процедура «разыгрывания» случайных величин методом Монте-Карло по заданному закону реализуется при этом максимально удобно и просто, результаты анализа корреляционных связей логичны и убедительны, однако определить число и границы кластеров на конкретных частотах любыми методами, кроме экспертного и теоретико-вероятностного, возможности нет [4; 15].

Во-вторых, длина l_k линейного фрагмента ТЭИ должна удовлетворять условию $2\pi l_k / \lambda_k \ll 1$, что дает $l_k < 0,016\lambda_k$, где λ_k – длина волны для k -й

частоты энергетического спектра КИ-сигнала. Таким образом, как относительный, так и абсолютный размеры l_k должны быть достаточно малыми (особенно абсолютный размер на высоких частотах), чтобы ТЭИ действительно был элементарным источником, на базе которого построены все ТКМ-модели. Но тогда и число ТЭИ в пределах одного кластера, и число таких кластеров, в отличие, например, от апертурной антенны, состоящей из элементов Гюйгенса [4; 15–17], определяются условиями ее возбуждения, которые оговаривает ОМС. С одной стороны, это упрощает процедуру моделирования, поскольку точечные ТЭИ располагаются лишь в узловых дискретных точках (в центре каждого кластера), тогда как элементы Гюйгенса непрерывно «выстилают» всю поверхность апертуры, поэтому в [16; 17] на каждой частоте необходимо было рассчитывать их число и размеры. С другой стороны, для разделения РСА на кластеры здесь также невозможно использовать какие-либо методы, кроме эвристического. Субъективные факторы, формирующие ОМС, при этом выходят на первый план, поскольку перед началом моделирования нужно согласовать мнения разных ЛПР, которые могут иметь разные суждения об условиях работы РСА.

Важным третьим моментом является использование принципа безразличия Лапласа в ТКМ-моделях с целью наиболее адекватного учета неопределенности знаний ЛПР о свойствах и параметрах РСА. Данный принцип определяет равномерные законы распределения всех видов ошибок (амплитудных, фазовых, временных, геометрических и др.), присущих КИ-сигналам – как возбуждающим, так и излучаемым РСА. Кроме того, он предполагает равные вероятности всех статистических ситуаций, учитываемых путем вероятностной комбинаторики. Отказ от этих ограничений в рамках ТКМ возможен, но только за счет снижения неопределенности знаний ЛПР о конфигурации и свойствах РСА.

В-четвертых, как уже было сказано, системе ТЭИ, которая является ТКМ-моделью РСА на рисунке 2, в разных условиях соответствует разный объем V_s . Если считать, что ЭМП источников, формирующих КИ-сигнал в точке M_s , присутствует только в объеме защищенного офиса, то V_s представляет собой объем этого офиса. Если принять, что источники (особенно на низких частотах) находятся в пределах этажа офисного здания или даже в пределах многоэтажного здания целиком, то объем V_s , соответственно, возрастает. Если же ЛПР неверно оценят габариты модели на

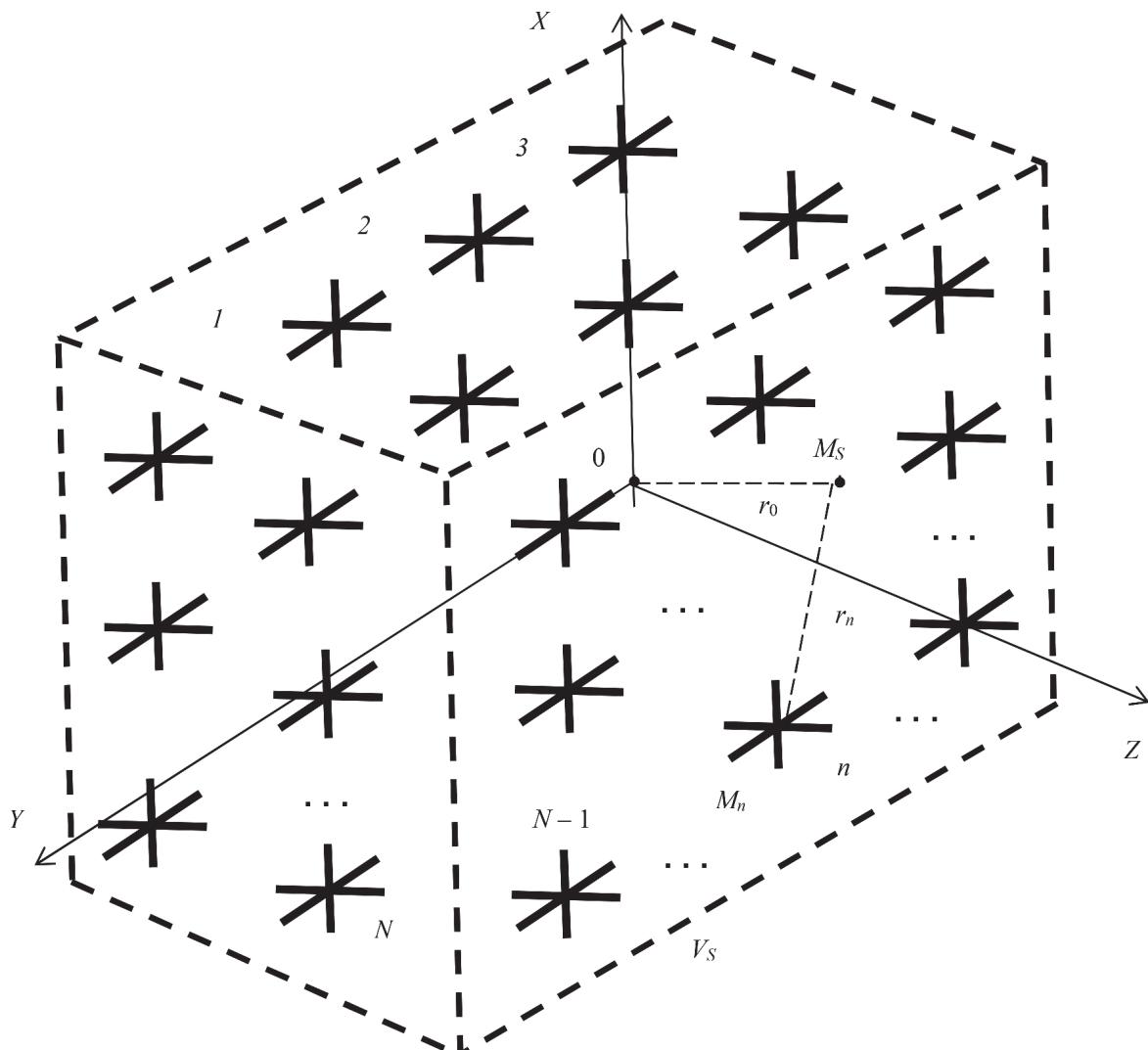


Рисунок 2. Вторая ТКМ-модель РСА

рисунке 2, то рассматриваемый фрагмент модели не будет адекватен реальной РСА – в первую очередь за счет ЭМП-источников, попадающих в точку M_s помимо V_s .

Первичные результаты моделирования в виде гистограмм уровней E -поля и H -поля, их фазовых и поляризационных характеристик близки к статистической радиофизике, для применения в инженерных целях их необходимо интерпретировать и адаптировать к конкретным исходным условиям. В качестве иллюстрации рассмотрим пример использования данных ТКМ-моделей при разработке системы активной защиты КИ.

Применение ТКМ-моделей РСА при проектировании систем защиты КИ

На рисунке 3 представлены способы обеспечения информационной безопасности РСА. Применительно к СЛ имеется в виду защита от утечки КИ:

- через систему электропитания 220 В; 50 Гц;
- через «систему земель»;

Методы и средства защиты
РСА от утечки КИ

Защита от утечки
КИ по СЛ

Защита от утечки
КИ по эфиру

Рисунок 3. Способы обеспечения безопасности РСА

- через экранированные системы и сети сигнализации и связи;
- через элементы систем охранной и пожарной защиты.

Это каналы утечки КИ внутреннего происхождения, здесь также используются фильтрация и экранирование КИ-сигналов, инженерные, режимные и другие организационные мероприятия.

Задача РСА по эфиру предполагает ликвидацию утечки КИ:

- посредством ЭМП, создаваемого во внешней среде элементами конструкции здания;
- через ЭМП «системы земель»;
- через внешнее ЭМП вспомогательных систем и сетей сигнализации и др.

Это внешние каналы утечки КИ: открытые СЛ, неэкранированные элементы, фильтровать и экранировать КИ-сигналы здесь не удается, инженерные, режимные и другие мероприятия неэффективны.

Очевидно, что в составе ОМС, которая соответствует решаемой проблеме, будут превалировать аксиологические знания, полученные с применением ТКМ-моделей РСА, хотя ЛПР-разработчикам систем активной защиты КИ, разумеется, хотелось бы опираться на более надежные верифицированные знания – в дополнение к данным, полученным эвристическим и экспериментальным путем. Если целью является предотвращение утечки КИ через РСА, то задача ставится следующим образом: систему защиты необходимо спроектировать так, чтобы для любой области возбуждения РСА в пределах объема V_s коэффициенты энергетического превышения χ_E для E -поля и χ_H для H -поля соответствовали условиям $\chi_E = E_p^2 / E_c^2 \geq \chi_{EN}$ и $\chi_H = H_p^2 / H_c^2 \geq \chi_{HN}$, где χ_{EN} и χ_{HN} – нормируемые значения χ_E и χ_H , которые обеспечивают требуемую степень защиты КИ-сигналов, циркулирующих в РСА, а низшие индексы « P » и « C », относятся к защитному сигналу (шумовому или шумоподобному заградительному, имитирующему или в виде прицельной помехи и т. п.), и КИ-сигналу, подлежащему защите, соответственно.

Тогда, воспользовавшись второй ТКМ-моделью РСА на рисунке 2, получаем, что оба приведенных условия должны выполняться во всех узловых точках M_n в пределах объема V_s , что является гарантией их выполнения в любой точке (сококупности точек) подключения к РСА средств перехвата КИ за пределами V_s . Отсюда следует методика тестирования и оценки эффективности системы защиты КИ, которая предусматривает на первом этапе проверку выполнения обоих условий: $\chi_E = E_p^2 / E_c^2 \geq \chi_{EN}$ и $\chi_H = H_p^2 / H_c^2 \geq \chi_{HN}$ в пределах офиса, а на втором этапе, при наличии такой возможности, – в месте предполагаемого размещения средств перехвата КИ. Остается добавить, что первая ТКМ-модель РСА (см. рисунок 1) является частным случаем (вариантом) реализации данной более общей модели.

Если целью является защита КИ от перехвата в точке M_s , когда вся РСА выступает в роли источника излучения сигнала, переносящего КИ

«по эфиру», задача становится более сложной и требует применения обеих ТКМ-моделей РСА. В отличие от предыдущего случая, когда E_c и E_p соответствуют волнам, распространяющимся внутри РСА, то есть по одной и той же направляющей проводной среде, здесь их условия излучения и распространения могут существенно отличаться друг от друга – как внутри, так и за пределами объема V_s . Ограничимся тремя типовыми вариантами ОМС, которые зависят от способа реализации системы активной защиты КИ.

1. Если источники ЭМП защитного сигнала E_p и H_p конструктивно совмещены с источниками КИ-сигнала, возбуждающего РСА, «работают» обе ТКМ-модели РСА и для оценки эффективности системы защиты КИ необходимо и достаточно обеспечить оба условия $\chi_E = E_p^2 / E_c^2 \geq \chi_{EN}$ и $\chi_H = H_p^2 / H_c^2 \geq \chi_{HN}$ в пределах офиса.

2. Если источники ЭМП сигнала E_p и H_p расположены в пространстве по аналогии с первой ТКМ-моделью РСА (в общем случае как внутри, так и вне объема V_s), возникает задача совмещения структуры двух взаимно независимых ЭМП: защитного сигнала E_p и H_p и КИ-сигнала E_c и H_c таким образом, чтобы обеспечить требуемую эффективность защиты в области возможного перехвата КИ за пределами офиса [2; 3 и др.]. Для ее решения необходимо снижение неопределенности знаний ЛПР о конфигурации и свойствах РСА, поскольку характеристики всех других элементов системы защиты КИ считаются известными.

3. Если ЭМП защитного сигнала E_p и H_p формируется путем интегрируционного преобразования КИ-сигнала E_c и H_c в модулях-ретрансляторах, размещенных на границе объема V_s [18; 19], к трудностям второго варианта добавляется стохастический характер ЭМП защитного сигнала, который по корреляционным свойствам может быть как близким, так и далеким КИ-сигналу, что также нужно учитывать разработчикам системы защиты КИ.

На первый взгляд в двух последних случаях ТКМ-модели РСА мало чем облегчают жизнь специалистам-практикам. Однако это не так, если вспомнить, что вклад РСА в ЭМП сигнала утечки КИ «по эфиру» является наиболее заметным на самых низких частотах [6], где ТКМ-модели (см. рисунок 2) могут состоять из $N = 1\dots 2$ слабонаправленных ТЭИ. Трудности моделирования их ЭМП резко снижаются, к тому же влиянием всех видов ошибок (ввиду больших значений длин волн λ_p и λ_c сигналов E_p и H_p ; E_c и H_c) здесь можно пренебречь, так что решаемая задача становится квазидетерминированной.

В то же время возможности ТКМ за счет применения средств вероятностной комбинаторики позволяют промоделировать главный эффект, отличающий РСА от любых других антенн: непредсказуемый заранее, стохастический (полностью или частично) характер как возбуждения (внутренняя задача ТСА), так и формирования ЭМП в точке наблюдения M_s (внешняя задача ТСА). При решении инженерных задач – связанных, в частности, с разработкой и анализом эффективности систем активной защиты КИ – имеет смысл комбинировать обе ТКМ-модели РСА.

Заключение

Представленные ТКМ-модели позволяют ЛПР понять и в первом приближении воспроизвести физические процессы, сопровождающие формирование ЭМП-каналов утечки КИ через РСА – несмотря на трудности, возникающие ввиду неопределенности знаний об их конфигурации, условиях возбуждения и других свойствах. Ключевым моментом при разработке ОМС является применение аналогов (модификаций) принципа Гюйгенса – Кирхгофа, в соответствии с которыми объем V_s , занимаемый РСА, может быть представлен как совокупность корреляционных кластеров, образующих решетку ТЭИ.

Открытый характер ТКМ-моделей РСА дает возможность ЛПР использовать статистические и экспериментальные исходные данные, полученные при исследовании объектов защиты КИ. Помимо дальнейшего развития ТСА, это имеет важное прикладное значение для разработки, проектирования и оценки эффективности перспективных низкоэнергетических систем защиты КИ от утечки по ЭМП-каналам через РСА [20–24].

Литература

1. Маслов О.Н. Теория случайных антенн: первые 10 лет развития и применения // Антенны. 2017. № 9 (241). С. 37–59.
2. Маслов О.Н. Случайные антенны: теория и практика. Самара: Изд-во ПГУТИ-ОФОРТ, 2013. 480 с.
3. Принципы информационной защиты распределенных случайных антенн / П.С. Заседателева [и др.] // Инфокоммуникационные технологии. 2013. Т. 11, № 2. С. 69–78.
4. Маслов О.Н. Онтологические принципы развития статистической теории антенн // Антенны. 2015. № 4. С. 15–25.
5. Маслов О.Н., Шашенков В.Ф. Электромагнитное экранирование оборудования и по- мещений // Приложение к журналу «Инфокоммуникационные технологии». Вып. 7. Самара: Изд-во ПГУТИ, 2011. 256 с.
6. Взаимодействие случайных антенн, размещенных в многоэтажном офисном здании / П.С. Заседателева [и др.] // Инфокоммуникационные технологии. 2013. Т. 11, № 3. С. 83–87.
7. Заседателева П.С., Маслов О.Н. Рябушкин А.В. Информационная защита распределенных случайных антенн с применением нелинейных преобразователей // Нелинейный мир. 2014. Т. 12, № 12. С. 31–41.
8. Маслов О.Н. Защита распределенной случайной антенны от утечки информации по каналу ВЧ-навязывания // Специальная техника. 2017. № 2. С. 38–48.
9. Маслов О.Н. Триадно-кластерный метод анализа и моделирования случайных антенн // Электросвязь. 2016. № 10. С. 69–74.
10. Маслов О.Н., Шаталов И.С. Триадно-кластерные модели типовых случайных антенн // Инфокоммуникационные технологии. 2018. Т. 16, № 1. С. 131–142.
11. Maslov O.N., Shatalov I.S. The simulation of equivalent currents exciting a stochastic aperture radiator // SPIE Proceedings. 2018. Vol. 10774. P. 107740S. DOI: <https://doi.org/10.1117/12.2317729>
12. Maslov O.N., Shatalov I.S. Simulation of statistical characteristics of aperture random antenna by triad-cluster method // SPIE Proceedings. 2019. Vol. 11146. P. 111460A. DOI: <https://doi.org/10.1117/12.2524835>
13. Alyshev Y.V., Maslov O.N., Shatalov I.S. Spatial analogue of the Huygens–Kirchhoff principle and its application for simulation of random radiating systems // SPIE Proceedings. 2020. Vol. 11516. P. 1151618. DOI: <https://doi.org/10.1117/12.2565377>
14. Айзенберг Г.З. Антенны ультракоротких волн. М.: Связьиздат, 1957. 700 с.
15. Маслов О.Н. Возможности и перспективы применения метода СИМ при решении внутренних задач СТА // Инфокоммуникационные технологии. 2010. Т. 8, № 2. С. 8–22.
16. Маслов О.Н., Раков А.С., Силкин А.А. Статистические характеристики поля решетки апертурных случайных антенн // Радиотехника и электроника. 2013. Т. 58, № 11. С. 1093–1101.
17. Маслов О.Н., Раков А.С., Силкин А.А. Статистические модели волнового поля апер-

- турной случайной антенны // Радиотехника и электроника. 2015. Т. 60, № 6. С. 642–649.
18. Маслов О.Н. Низкоэнергетическая информационная защита случайных антенн // Электросвязь. 2014. № 1. С. 32–38.
 19. Маслов О.Н. Модуль-ретранслятор для низкоэнергетической информационной защиты случайных антенн // Электросвязь. 2015. № 1. С. 40–45.
 20. Алышев Ю.В., Маслов О.Н., Раков А.С., Шашенков В.Ф. Способ информационной защиты случайной антенны. Патент RU 2 474 966 C1 от 30.11.2011, опубл. 10.02.2013, бюлл. № 4.
 21. Алышев Ю.В., Маслов О.Н., Шашенков В.Ф. Способ информационной защиты распределенной случайной антенны. Патент RU 2492581 от 30.11.2011, опубл. 20.12.2012, бюлл. № 35.
 22. Маслов О.Н., Заседателева П.С. Способ защиты информации в распределенной случайной антенне. Патент RU 2502195 от 02.09.2011, опубл. 20.12.2013, бюлл. № 35.
 23. Маслов О.Н., Шашенков В.Ф., Борисова И.Е. Устройство для информационной защиты распределенной случайной антенны. Патент RU 2503132 от 30.11.2011, опубл. 27.12.2013, бюлл. № 36.

Получено 20.11.2020

Добрынин Сергей Сергеевич, аспирант кафедры прикладной информатики (ПИ) Поволжского государственного университета телекоммуникаций и информатики (ПГУТИ). 443010, Российская Федерация, г. Самара, ул. Л. Толстого, 23. Тел. +7 967 769-97-77. E-mail: sdobrynin@rambler.ru

Маслов Олег Николаевич, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой ПИ ПГУТИ. 443010, Российская Федерация, г. Самара, ул. Л. Толстого, 23. Тел. +7 917 950-05-13. E-mail: maslov@psuti.ru

Шаталов Иван Сергеевич, аспирант кафедры ПИ ПГУТИ. 443010, Российская Федерация, г. Самара, ул. Л. Толстого, 23. Тел. +7 927 732-54-22. E-mail: shatalovivv@gmail.com

ONTOLOGICAL PRINCIPLES OF SIMULATION OF DISTRIBUTED RANDOM ANTENNA

Dobrynin S.S., Maslov O.N., Shatalov I.S.

*Povelzhskiy State University of Telecommunications and Informatics, Samara, Russian Federation
E-mail: maslov@psuti.ru*

The paper considers ontological foundations of simulation of distributed random antenna (DRA) by triad-cluster method (TCM) using triadic elementary radiator (TER) as the basic element, as well as Laplace and Huygens-Kirchhoff principles. The features of internal and external electrodynamics problems solution, including the formulation of the initial conditions and the general principles for determining characteristics of DRA, are considered. TCM-models corresponding to partial and complete uncertainty of knowledge of decision-makers (DM) about configuration, excitation conditions and other properties of DRA are presented. These models allow the decision maker to understand and reproduce, in a first approximation, the physical processes occur during the formation confidential information leakage channels into the external environment through DRA.

Keywords: *random antenna theory, distributed random antenna, statistical simulation modeling, triad-cluster method, ontological model of situation, applying of simulation results*

DOI: 10.18469/ikt.2021.19.1.02

Dobrynin Sergey Sergeevich, Povelzhskiy State University of Telecommunication and Informatics, 23, L. Tolstoy Street, Samara, 443010, Russian Federation; PhD Student of Applied Informatics Department. Tel. +7 967 769-97-77. E-mail: sdobrynin@rambler.ru

Maslov Oleg Nikolaevich, Povolzhskiy State University of Telecommunication and Informatics, 23, L. Tolstoy Street, Samara, 443010, Russian Federation; Head of Applied Informatics Department, Doctor of Technical Science, Professor. Tel. +7 917 950-05-13. E-mail: maslov@psati.ru

Shatalov Ivan Sergeevich, Povolzhskiy State University of Telecommunication and Informatics, 23, L. Tolstoy Street, Samara, 443010, Russian Federation; PhD Student of Applied Informatics Department. Tel. +7 927 732-54-22. E-mail: shatalovivv@gmail.com

References

1. Maslov O.N. Random antenna theory: the first 10 years of development and application. *Antenny*, 2017, no. 9 (241), pp. 37–59. (In Russ.)
2. Maslov O.N. *Random Antennas: Theory and Practice*. Samara: Izd-vo PGUTI-OFORT, 2013, 480 p. (In Russ.)
3. Zasedateleva P.S. et al. Principles of information protection of distributed random antennas. *Infokommunikacionnye tehnologii*, 2013, vol. 11, no. 2, pp. 69–78. (In Russ.)
4. Maslov O.N. Ontological principles for the development of statistical antenna theory. *Antenny*, 2015, no. 4, pp. 15–25. (In Russ.)
5. Maslov O.N., Shashenkov V.F. Electromagnetic shielding of equipment and premises. *Prilozhenie k zhurnalu «Infokommunikacionnye tehnologii»*, no. 7, Samara: Izd-vo PGUTI, 2011, 256 p. (In Russ.)
6. Zasedateleva P.S. et al. Interaction of random antennas placed in a multi-storey office building. *Infokommunikacionnye tehnologii*, 2013, vol. 11, no. 3, pp. 83–87. (In Russ.)
7. Zasedateleva P.S., Maslov O.N., Ryabushkin A.V. Information protection of distributed random antennas using nonlinear converters. *Nelinejnyj mir*, 2014, vol. 12, no. 12, pp. 31–41. (In Russ.)
8. Maslov O.N. Protection of a distributed random antenna against information leakage over the HF-intrusion channel. *Spetsial'naja tehnika*, 2017, no. 2, pp. 38–48. (In Russ.)
9. Maslov O.N. Triad-cluster method for analysis and modeling of random antennas. *Elektrosvjaz'*, 2016, no. 10, pp. 69–74. (In Russ.)
10. Maslov O.N., Shatalov I.S. Triad-cluster models of typical random antennas. *Infokommunikacionnye tehnologii*, 2018, vol. 16, no. 1, pp. 131–142. (In Russ.)
11. Maslov O.N., Shatalov I.S. The simulation of equivalent currents exciting a stochastic aperture radiator. *SPIE Proceedings*, 2018, vol. 10774, pp. 107740S. DOI: <https://doi.org/10.1117/12.2317729>
12. Maslov O.N., Shatalov I.S. Simulation of statistical characteristics of aperture random antenna by triad-cluster method. *SPIE Proceedings*, 2019, vol. 11146, pp. 111460A. DOI: <https://doi.org/10.1117/12.2524835>
13. Alyshev Y.V., Maslov O.N., Shatalov I.S. Spatial analogue of the Huygens–Kirchhoff principle and its application for simulation of random radiating systems. *SPIE Proceedings*, 2020, vol. 11516, pp. 1151618. DOI: <https://doi.org/10.1117/12.2565377>
14. Ajzenberg G.Z. *Ultrashort Wave Antennas*. Moscow: Svjaz'izdat, 1957, 700 p. (In Russ.)
15. Maslov O.N. Possibilities and prospects of using the SIM method in solving internal STA problems. *Infokommunikacionnye tehnologii*, 2010, vol. 8, no. 2, pp. 8–22. (In Russ.)
16. Maslov O.N., Rakov A.S., Silkin A.A. Statistical characteristics of the field of an array of aperture random antennas. *Radiotekhnika i elektronika*, 2013, vol. 58, no. 11, pp. 1093–1101. (In Russ.)
17. Maslov O.N., Rakov A.S., Silkin A.A. Statistical models of the aperture random antenna wavefield. *Radiotekhnika i elektronika*, 2015, vol. 60, no. 6, pp. 642–649. (In Russ.)
18. Maslov O.N. Low energy information protection of random antennas. *Elektrosvjaz'*, 2014, no. 1, pp. 32–38. (In Russ.)
19. Maslov O.N. Repeater module for low-energy information protection of random antennas. *Elektrosvjaz'*, 2015, no. 1, pp. 40–45. (In Russ.)

20. Alyshev Yu.V., Maslov O.N., Rakov A.S., Shashenkov V.F. A method for information protection of a random antenna. Patent RU 2 474 966 C1 from 30.11.2011, publ. 10.02.2013, bull. no. 4. (In Russ.)
21. Alyshev Yu.V., Maslov O.N., Shashenkov V.F. Method for information protection of a distributed random antenna. Patent RU 2470465 from 20.12.2010, publ. 20.12.2012, bull. no. 35. (In Russ.)
22. Maslov O.N., Zasedateleva P.S. A method for protecting information in a distributed random antenna. Patent RU 2492581 from 30.11.2011, publ. 10.09.2013, bull. no. 25. (In Russ.)
23. Maslov O.N., Shashenkov V.F., Borisova I.E. A device for information protection of a distributed random antenna. Patent RU 2502195 from 02.09.2011, publ. 20.12.2013, bull. no. 35. (In Russ.)
24. Maslov O.N., Scherbakova T.A. A method for protecting a distributed random antenna. Patent RU 2503132 from 30.11.2011, publ. 27.12.2013, bull. no. 36. (In Russ.)

Received 20.11.2020

ТЕХНОЛОГИИ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ

УДК 621.315

ПРОСТАЯ ПРИБЛИЖЕННАЯ ФОРМУЛА ДЛЯ ПРОГНОЗА СРОКА СЛУЖБЫ ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКОН КАБЕЛЬНОЙ ЛИНИИ СВЯЗИ

Нижегородов А.О.

Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики, Самара, РФ
E-mail: anton.socol2017@yandex.ru

Статья посвящена прогнозированию срока службы оптических кабельных линий связи, который определяется сроком службы оптических волокон. На основе известных формул для расчета показателей надежности оптических волокон с учетом требований к надежности кабельных сетей и диапазонов изменения параметров разрушения кварцевых световодов получены приближенные формулы для расчета срока службы кабеля линий связи с заданной вероятностью. Формулы получены для постоянной нагрузки на волокна кабеля с учетом их случайного характера. Даны оценки погрешности предложенных формул. Расчеты показывают, что ошибки в интересующей области надежности линий связи по сравнению с известными более строгими формулами не превышают долей процента, что позволяет рекомендовать полученные соотношения к использованию.

Ключевые слова: оптическое волокно, оптический кабель, волоконно-оптическая линия связи, надежность, срок службы

Введение

На сегодняшний день в России основные волоконно-оптические линии связи (ВОЛС), проложенные 25–30 лет назад, подходят вплотную к сроку износа. Срок службы применяемых на этих ВОЛС оптических кабелей (ОК) превысил параметры, заявленные заводами-изготовителями по результатам входного контроля и выданных сертификатов. Вследствие этого ожидается начало периода резкого увеличения интенсивности отказов на ВОЛС.

Указанная проблема делает актуальной задачу прогноза срока службы ОК, в особенности с учетом того, что резкое увеличение интенсивности отказов ВОЛС приведет к потере устойчивости сетей связи в целом [1–3]. Согласно рекомендациям Международного союза электросвязи, в области телекоммуникаций (МСЭ-Т), срок службы ОК рекомендуется оценивать по сроку

службы оптического волокна (ОВ), используемого в кабеле. В дополнении 59 к рекомендациям МСЭ-Т серии G предложена следующая формула для расчета срока службы ОК [4]:

$$t_a = t_p \left(\frac{\sigma_p}{\sigma_a} \right)^n \left\{ \left[1 - \frac{\ln(1-F)}{N_p L} \right]^{\frac{1}{m_s}} - 1 \right\}, \quad (1)$$

которую можно записать в следующем виде [5–7]:

$$t_a = \frac{1}{\sigma_a^n} \left\{ \left[\frac{\beta^{m_s}}{L} \ln \frac{1}{P} + (\sigma_p^n t_p)^{m_s} \right]^{\frac{1}{m_s}} - \sigma_p^n t_p \right\}. \quad (2)$$

При этом, согласно [4–7],

$$\beta = \sigma_p^n t_p N_p^{\frac{1}{m_s}} = \sigma_p^n t_p L_p^{\frac{1}{m_s}}, \quad (3)$$

где t_p – время испытания ОВ при выполнении испытания под нагрузкой (proof-test); σ_p – нагрузка