ОЦЕНКА ЖИВУЧЕСТИ РАСПРЕДЕЛЕННЫХ ИНТЕГРИРОВАННЫХ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ

Р.В. Максимов, Е.А. Савинов

Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет) (СГАУ), Самара, Россия

Работа относится к области безопасности информационных сетей и может быть использована при сравнительной оценке информационных сетей на предмет их устойчивости к отказам, вызванным воздействиями случайных и преднамеренных помех. Приводятся четыре, естественные с практической точки зрения, постановки задачи сравнительного оценивания устойчивости работы сетей с различной топологией. Основная задача решена с помощью имитационного моделирования. Вторая из двух подробно рассматриваемых моделей является хорошо известной моделью Ватсона и Лиса. Техническим результатом является повышение достоверности результатов сравнительной оценки структур информационных сетей. Оценивается качество информационной системы, подвергшейся воздействию случайных и преднамеренных помех, с помощью понятия «порогового распределения». Изложен порядок использования имитационной модели. Обозначено направление дальнейших исследований.

Ключевые слова: информационная безопасность, структура информационной сети, волоконно-оптические линии связи, живучесть, преднамеренные помехи.

Введение

При обеспечении информационной безопасности интегрированных информационных систем необходимо решать задачу сравнительной оценки структур информационных систем, конкурирующих на предмет их реализации в условиях воздействия случайных (явления техногенного характера, такие как сбои, отказы и аварии систем обеспечения узла сети) и преднамеренных (умышленное использование дефектов программного обеспечения) программных помех (деструктивных воздействий).

Такие воздействия – это возмущения, снижающие качество информационных систем: реальную скорость передачи данных (фрагментация пакетов сообщений) и доступность узлов (средств) связи (отказ в обслуживании) посредством создания дополнительной (нештатной) нагрузки на процессы и устройства их реализующие.

Информационный обмен между абонентами защищенных сегментов информационных систем (ИС) осуществляют маршрутизацией пакетов сообщений через последовательность транзитных узлов сетей связи общего пользования (ССОП). Совокупность альтернативных маршрутов пакетов сообщений между корреспондирующими абонентами составляет структуру ИС.

Использование для информационного обмена интегрированных систем приводит к необходимости давать интегрированную оценку – то есть оценивать качество подсистем, не принадлежащих оценщику. Кроме того, что объекты оценки принадлежат третьим лицам, состоящие из них сети связи являются, безусловно, большими и динамичными. Можно говорить даже не о структуре ИС, а о процессе ее структурирования. Несмотря на то, что волоконно-оптические линии связи ИС являются высоконадежными элементами при условии их функционирования в штатном режиме, информация о структуре ИС постоянно меняется, а оптические мультиплексоры («узлы» ИС) могут подвергаться воздействию интеллектуальных (программных) помех. Живучесть – это способность информационных систем выполнить свои основные функции, несмотря на действие возмущений.

Целью данной работы является постановка основной и ряда альтернативных задач сравнительной оценки живучести распределенных интегрированных ИС в условиях воздействия на них случайных и преднамеренных помех, описание общего алгоритма и пример частного решение основной задачи методом имитационного моделирования в случае ИС с конкретной конфигурацией.

Адаптация структуры интегрированной ИС к воздействиям дестабилизирующих факторов внешней среды осуществляется путем выбора наилучшей структуры ИС из числа допустимых альтернатив, а также прогнозированием ее качества при увеличении или уменьшении количества структурных элементов. При этом поиск альтернатив может осуществляться путем мониторинга сети связи общего пользования специализированным ПО (утилиты tracert, ping и pathping).

Теоретической основой методики оценки являются теория систем управления, теория вероятностей, математическая статистика, теория перколяции. Теория перколяции (от англ. percolation – протекание) – одна из ветвей развития теории графов. Воздействие на ИС случайных и преднамеренных программных помех, вызывающих цепочки отказов, аналогично представленному в работах [1, 2, 3] процессу перколяции и дает возможность описать в простой форме глобально процессы деградации ИС наподобие эпидемии.

Известная из [4] методика применима только для структур, размер которых можно принять бесконечным по количеству структурных элементов. Для конечных структур критическое (или пороговое) значение доступности узла, являющееся ключевым характеризующим параметром, как мы увидим далее, не только не является детерминированной величиной, но и не измерима (т.е. принципиально не вычисляема) в рамках проведенного опыта. Возможны лишь статистические оценки ее числовых характеристик и закона распределения.

Постановка основной задачи (Задача 1)

Предположим, мы имеем ИС произвольной топологии, в двух точках которой располагаются два абонента. Будем исследовать ИС на предмет способности обеспечить информационный обмен между этими абонентами в условиях воздействия случайных и преднамеренных помех. Для этого будем считать, что каждый узел под действием случайных и преднамеренных помех независимо от других доступен (исправно работает) лишь некоторую фиксированную долю времени. Очевидно, в каждый момент времени связь между абонентами (возможность передачи информационных пакетов по маршруту из доступных узлов) может, как сохраниться, так и нарушиться.

Будем решать задачу сравнительного оценивания живучести сети с помощью ввода нового параметра, характеризующего данную сеть.

В качестве исходной модели ИС примем некоторый неориентированный граф (сеть) $\{(V,E),A,B\}$ с N узлами, два из которых, A и B, отмечены как основные (моделируют абонентов). Считаем, что каждый узел независимо от других доступен в данный момент с вероятностью p. По сути мы имеем модель независимых испытаний Бернулли $\left(\Omega,F,P_{(p)}\right)$, где $|\Omega|=2^N, F=2^\Omega, P_{(p)}(\omega)=p^k(1-p)^{N-k}$, а k – количество доступных в данный момент узлов. На этом вероятностном пространстве введем случайную величину Z, равную нулю, если связь между абонентами отсутствует, и единице, если связь сохранилась в результате опыта (одной серии испытаний).

Обозначим ее математическое ожидание $G(p):=EZ=P_{(p)}\{Z=1\}$.

Заметим, что функция G(p) обладает свойствами функции распределения. Введем новое вероятностное пространство $\left([0,1],B[0,1],P_G\right)$, с мерой, порожденной функцией G, и определим на нем тождественную случайную величину

$$p_{CR}(\omega:=\omega),\omega\in[0,1],$$

которую будем называть пороговым значением доступности. Введенная величина имеет распределение G(p) и для нее выполняется следующее равенство

$$P_G\{p_{CR}\le p\}=P_{(p)}\{Z=1\}.$$

Таким образом, значение величины pCR можно понимать как результат действия такого комплекса внешних условий, при котором проведение опыта над ИС с параметром $p\ge p_{CR}$ с необходимостью приводит к сохранению связи между абонентами A и B, а при $p<p_{CR}$ – к отсутствию связи. Этим объясняется введенное определение. Функцию G(p) будем называть пороговой функцией или пороговым распределением. Отметим, что пороговое значение доступности pCR не является измеримой величиной относительно

$$F=2^\Omega$$

(не наблюдаема по результатам описанного опыта, хотя и может быть вычислена в процессе, если построить опыт специальным образом) и полностью характеризует живучесть ИС $\{(V,E),A,B\}$ при любом уровне возмущений.

В качестве интегральной характеристики живучести сети примем Ep_{CR} – математическое ожидание порогового значения доступности. Более устойчивая система будет характеризоваться меньшим средним значением порога.

Оценка этого значения для заданной ИС и составляет рассматриваемую задачу.

Порядок использования модели

Для решения задачи оценивания живучести ИС посредством измерения ее среднего порогового значения доступности используем имитационное моделирование.
Прежде всего, необходимо построить оценку пороговой функции *G(p)*. Далее, используя полученный результат, построить оценку для Ep_{CR} .

Проведем *m* наблюдений над случайной величиной *Z* при одном и том же значении *p*. В результате получим выборку $X = (X_1, X_2, \ldots, X_m)$ из распределения Бернулли с параметром *G(p)*. В качестве точечной оценки будем использовать выборочное среднее $\bar{X}$. Учитывая свойство асимптотической нормальности последнего, можно получить (асимптотическую) интервальную оценку

$$P\left\{\left|\bar{X} - G(p)\right| < \frac{Z_{\alpha/2}}{2\sqrt{m}}\right\} \geq \beta \approx 1 - \alpha ,$$

где $Z_{\alpha/2}$ нормальная квантиль, а приближение тем точнее, чем больше *m* и чем ближе вероятность G(*p*) к значению ½. Задавая априорно радиус окрестности *d*, оценим число опытов, необходимое для достижения уровня доверия $1-\alpha$:

$$m = \left[Z_{\alpha/2}^2 \big/ 4d^2 \right] .$$

Безусловно, относиться к этому значению следует лишь как к приближенной нижней оценке.

Итак, порядок моделирования будем следующим. Зададим требуемые значения радиуса и уровня доверия, вычислим по ним необходимое минимальное число наблюдений *m*.

Пробегая значения доступности *p* в некотором диапазоне с шагом Δp, получаем оценки для *G(p)*.

Величину Δp задаем исходя из требуемой точности результатов расчетов в интервале Δp = 0,01..0,2.

На рис. 1 показаны эмпирические кривые зависимости вероятности нарушения связи между абонентами от вероятности $q = 1 - p$ «недоступности» узла.

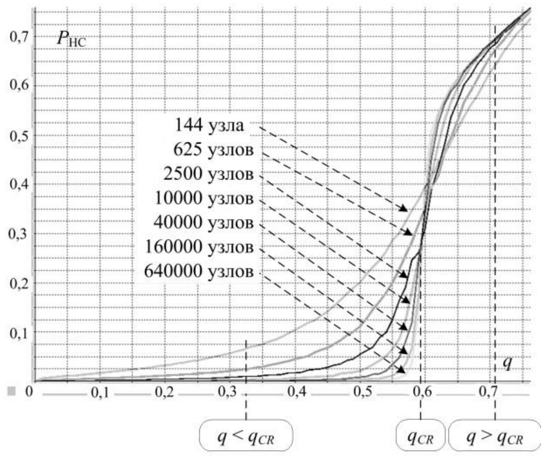

Рис. 1. Зависимость $P_{НС}$ от вероятности недоступности узлов, подверженных деструктивным воздействиям

Эти эмпирические зависимости соответствуют функции

$$P_{HC}(q) = 1 - G(1-q)$$

и рассчитаны для случая идеализированных регулярных решеток со связностью узлов, равной четырем. Количество числом узлов (см. рис. 2) варьируется. Видно, как при увеличении числа узлов пороговое распределение вырождается, и пороговое значение

$q_{CR} = 1 - p_{CR}$ приближается к константе.

Обозначим через $G_*(p)$ результат интерполяции построенных оценок пороговой функции G(p). Для построения оценки для Ep_{CR} можно использовать одну из следующих процедур.

Метод инверсии

1. Получить выборку достаточно большого объема *n*:

$Y = (Y_1, Y_2, \ldots, Y_n)$ из равномерного на [0,1] распределения, используя генератор псевдослучайных последовательностей.

2. Вычислить величины

$$T_i = G_*^{[-1]}(Y_i),$$

где $G_*^{[-1]}$ – квазиобратная функция

$$G_*^{[-1]}(y) = \inf\{t : G_*(t) \geq y\}.$$

3. Статистика

$$\bar{T} = 1/n \sum_{i=1}^{n} T_i$$

будет точечной оценкой Ep_{CR}.

Численное интегрирование

Интеграл

$$\bar{T} = \int_0^1 [1 - G_*(p)]dp$$

также является точечной оценкой для Ep_{CR}.

Альтернативные задачи оценивания живучести

Задача 2

Рассмотрим опыт, аналогичный опыту Ватсона и Лиса с квадратной экранной сеткой [2] (рис. 2).

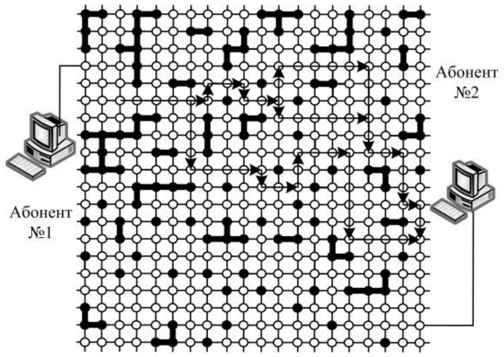

Рис. 2. Вариант регулярной структуры ИС с заданным количеством «опасных» узлов

Предположим, изначально все узлы сети $\{(V,E),A,B\}$ доступны. Начинаем отключать их по одному, выбирая на шаге *n* очередной узел с номером U_n из работающих равномерно случайным образом. Ведем процесс до тех пор, пока не исчезнет связь между узлами *A* и *B*. Доля работающих на этот момент узлов – реализация случайной величины, которую мы обозначим

$$p_{CR} = 1 - \tau/N ,$$

где τ – (случайный) момент остановки относительно естественной фильтрации случайного процесса $\{U_n\}$. Отметим, что при этом значение p_{CR} полностью определяется процессом $\{U_n\}$ вплоть до момента остановки (говорят, что случайная величина p_{CR} измерима относительно σ-алгебры F_τ-событий, наблюдаемых до случайного момента τ включительно).

Величину p_{CR} называют *порогом протекания*.

В качестве интегральной характеристики живучести ИС можно рассматривать величину Ep_{CR}. Наиболее надежной в среднем можно называть сеть, обладающую наименьшим значением Ep_{CR}.

В этом случае, наблюдая величину p_{CR} *m* раз, получив выборку $X = (X_1, X_2, \dots, X_m)$ имеем точечную оценку $\bar{X}$ для Ep_{CR}.

Можно получить и асимптотическую интервальную оценку, вспомнив, что выборочное среднее (при условии конечности второго момента) является асимптотически нормальной оценкой математического ожидания: распределение $\bar{X}$ при больших *m* близко к $N(Ep_{CR}, Dp_{CR}/m)$. Тогда, проводя серию из *m* опытов *M* раз и получая выборку $Y = (\bar{X}_1, \bar{X}_2, \dots, \bar{X}_m)$, можно заключить, что

$$P\left\{\left|\bar{Y} - Ep_{CR}\right| < \left|Z_{\alpha/2}(M)\right| S_0 / \sqrt{M}\right\} \approx 1 - \alpha ,$$

где $Z_{\alpha/2}(M)$ – квантиль *t*-распределения Стьюдента с *M* степенями свободы,

$$S_0^2 = \frac{1}{M-1}\sum_{i=1}^{M}\left(\bar{X}_i - \bar{Y}\right)^2 ,$$

$$\bar{Y} = 1/M \sum_{i=1}^{M} \bar{X}_i ,$$

и приближение к $1-\alpha$ тем точнее, чем больше m.

Следующие две задачи мы приведем как возможные вариации рассмотренных выше. Их решение методом имитационного моделирования также представляет интерес для практической оценки безопасности ИС.

Задача 3

Немного изменим опыт Ватсона и Лиса. Для некоторого наперед заданного числа р будем при выборе очередного узла с вероятностью $1-p$ его отключать (и считать недоступным), а с вероятностью р не менять ничего. Остановка процесса случайного перебора узлов происходит снова в тот момент, когда разрывается связь между А и В. Далее, как и в задаче 2 оценивается среднее значение зафиксированного порога протекания.

Задача 4

В этом варианте мы для заранее заданного р отключаем случайным образом последовательно $[qN]$ узлов (считаем их недоступными или «опасными»), где $q=1-p$ (т. е. в отличие от опыта Ватсона и Лиса сами задаем момент остановки). Совокупность связанных между собой «недоступных» структурных элементов ИС образует внутри ИС структуру («кластер»), свойства которой описывают, например, в [1, стр. 108 – 150]. После такого отбора проверяем, сохранилась ли связь между абонентами.

Далее определяем величину Z как в задаче 1, а затем вводим понятие порогового значения доступности, характеристики которого и оцениваем.

Необходимо отметить, что в качестве интегральных характеристик живучести могут выступать и другие статистики, например, выборочная медиана. Кроме того, может быть интересна не рассматривавшаяся в данной работе задача проверки гипотезы о пороговом распределении (в альтернативных постановках – распределении порога протекания), которое для конечной структуры сильно отличается от вырожденного.

Заключение

В работе поставлен спектр задач, связанных с критерием выбора наилучшей структуры ИС из числа допустимых альтернатив, основанных на оценке живучести в условиях воздействия на ИС случайных и преднамеренных помех. Приведены решения двух различных задач и обозначены дальнейшие направления исследований.

Литература

1. Федер, Е. Фракталы. М.: Мир, 1991. 254 с.
2. Эфрос, А.Л. Физика и геометрия беспорядка // Библ. «Квант», выпуск 19. М.: Наука, 1982. 264 с.
3. Grimmett, G. Percolation / G. Grimmett. Cambridge: Springer, 1999. 444 p.
4. Голуб, Б.В. Методика оценки живучести распределенных информационных систем / Б.В. Голуб, Е.М. Кузнецов, Р.В. Максимов // Вестник Самарского государственного университета. 2014. № 7 (118). С. 221-232.