Оценка живучести сложных информационных систем связи с подвижными объектами

Assessment of survivability of complex information communication systems with mobile units

Чжао Лэй / Zhao Lei
(zl_2321.student@mail.ru)
ФГАОУ ВПО «Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики» (НИУ ИТМО),
аспирант кафедры ГИС.
г. Санкт-Петербург

Бондаренко / Bondarenko I.
Игорь Борисович
(igorlitmo@rambler.ru)
кандидат технических наук.
НИУ ИТМО,
доцент кафедры ГИС.
г. Санкт-Петербург

Карманов / Karmanov A.
Андрей Геннадиевич
(karmanov.nip@gmail.com)
кандидат технических наук, доцент.
НИУ ИТМО,
доцент кафедры ГИС.
г. Санкт-Петербург

Ткачев / Tkachev K.
Константин Олегович
(kottok1@yandex.ru)
НИУ ИТМО,
старший преподаватель.
г. Санкт-Петербург

Ключевые слова: подвижный объект – mobile unit; протокол связи – communication protocol; время живучести систем – system survivability period.

Целью работы является оценка времени живучести систем связи с подвижными наземными объектами, использующими известные протоколы радиосвязи, то есть того интервала времени, после которого уровень безопасности при обмене информацией между объектами становится ниже критического. В ходе работы были проанализированы протоколы беспроводной связи и проведены эксперименты.

The purpose of the work is to assess survivability period of communication systems with mobile land units using known radio communication protocols, i.e. the time interval, after which the security level during information exchange between objects becomes below the critical value. Wireless communication protocols were analyzed and experiments were performed during the work.

Введение

В связи с развитием и усложнением систем связи на основе современных беспроводных протоколов, таких как WiFi, GSM, WiMAX, Bluetooth, DSRC и др. особо можно выделить проблему обеспечения их живучести. Живучесть определяется как способность систем (объектов) адаптироваться к новым (непредусмотренным) условиям эксплуатации, противостоять дестабилизирующим факторам и выполнять свою основную функцию цели. Отказы компонентов систем связи могут происходить из-за повреждений, аварийных ситуаций и во время атак.

Любым объектам, особенно сложным информационным системам, присуще эволюционное развитие, не описанное в "классическом" жизненном цикле (ЖЦ). Обычный ЖЦ представляет собой спираль и состоит из следующих основных стадий: возникновение задачи или потребности, разработка технического задания, проектирование, конструирование, разработка технологий, изготовление, испытания, эксплуатация и утилизация. Затем снова возникает потребность в новом объекте, и все стадии повторяются на новом, более современном витке: методов, технологий и требований пользователей. Помимо живучести, фирмы-производители определяют предполагаемый срок службы системы ($T_{сл}$), а также срок окупаемости ($T_{окуп}$). Поэтому при решении задачи создания новых систем связи с подвижными наземными объектами необходимо обеспечить их живучесть при минимизации затрат на разработку с определенным сроком службы.

Отметим, что эволюционное развитие сложных технических систем, таких как системы связи, – трудно формализуемый процесс. Результатом эволюции могут являться отрицательные последствия, поэтому разработка метода для оценки живучести в условиях действия дестабилизирующих факторов в данной работе является актуальной задачей.

Целью работы является оценка времени живучести систем ($T_ж$) связи с подвижными наземными объектами, использующими известные протоколы радиосвязи, то есть того интервала времени, после которого уровень безопасности при обмене информацией между объектами становится ниже критического. Грамотный процесс разработки систем связи должен обеспечивать выполнение неравенства $T_ж \geq T_{сл} > T_{окуп}$.

Постановка задачи

Живучесть определяется структурой (топологией) сети и надежностью ее элементов. Причем отказ элементов сети должен компенсироваться, а основная цель функционирования системы сохраняться как можно дольше по времени в условиях действия вредных факторов.

Запас структурной живучести системы будет определяться ее избыточностью и обеспечиваться резервированием элементов [1]. Большее время наработки на отказ i-х элементов с точки зрения надежности системы будет предпочтительнее:

$$p_{сист} \to \max f(p_i),\ i = \overline{1,m}.$$

Но живучесть, в отличие от отказоустойчивости, предполагает выполнение системой основной своей функции при нарушении ее первоначальной структуры и/или поведения элементов. Это невозможно выполнить без усложнения структуры и/или применения многофункциональных элементов, а также наличия средств защиты, диагностики и самоорганизации системы.

Модель оценки живучести сложной технической системы должна адекватно отражать зависимость показателей живучести от параметров системы: топологии сети G, цели C и условий ее функционирования U, а также решаемых задач Z. Общий показатель живучести системы Q имеет интегральный и комплексный характер зависимости от живучести входящих подсистем:

$$Q = \max Q(Q_1, Q_2, ..., Q_k),\ Q_i = f(G_i, C_i, U_i, Z_i, p_i).$$

В [2] было показано, что для беспроводных систем связи повышение времени противодействия атакам происходит при: усилении криптозащиты, уменьшении дальности связи, использовании направленных антенн, уменьшении объема передаваемых данных, изменении частоты и мощности сигнала, увеличении помехозащищенности аппаратуры. К воздействиям окружающей среды и атакующего человека одни подсистемы могут быть безразличны, а для других – они могут представлять реальную угрозу. Поэтому живучесть Q для различных ТС нельзя сравнить при неопределенности характера неблагоприятных воздействий как со стороны окружающей среды, так и наиболее вероятных атак со стороны атакующего.

Оценка устойчивости структуры распределенной в пространстве системы связи с подвижными объектами осуществляется в результате анализа графа G, в котором вершинам S соответствуют базовые и клиентские станции, ретрансляторы, а ребрам R – каналы связи. Тогда такой граф можно представить как:

$$\boldsymbol{G}=\{S, R\}.$$

Совокупность ребер, которую проходит сигнал от начальной точки ($S_{нач}$) к конечной ($S_{кон}$), образует путь. Длина пути (L) определяется как сумма длин ребер, входящих в путь:

$$L = \sum_{i=1}^{n} \|R_i\|,\ i = \overline{1,n},$$

где n – количество ребер в пути. Свойство связности графа на практике позволяет построить обходной путь, если невозможно проложить маршрут (при потере связи с определенными вершинами). Потеря связности графа, а также выполнение условия S=Ø или R=Ø, приводит на практике к полной потере связи между удаленными объектами. Следовательно, связность графа – необходимое условие живучести сложной системы связи. Математически проверка на связность графа не представляет проблемы, необходимо проверить выполнение условия: $R \geq S - 1$.

В то же время увеличение живучести происходит с ростом плотности графа:

$$\left|\frac{R}{S}\right| \to \max,$$

то есть с ростом количества каналов связи относительно радиоточек. Максимум плотности достигается в случае полносвязного графа, когда:

$$R = 0{,}5S(S-1).$$

Процедуры анализа графов распределенных ТС приведены в работах [2–4] и поэтому здесь рассматриваться не будут. Расчет живучести сложной ТС представляет наибольшую проблему из-за субъективной и объективной неопределенности [3]. Отказ важных для системы элементов приводит к катастрофическому снижению живучести, особенно при возникновении эффекта "домино" – последовательного нарушения условий функционирования, который обусловлен взаимосвязью подсистем. Разработка методики выявления зависимости живучести системы связи с подвижными объектами на основе открытых беспроводных протоколов от ее параметров и является основной задачей нашей работы.

Предложенные методы решения и полученные результаты

Анализ основных открытых протоколов, используемых для радиосвязи с подвижными наземными

объектами, таких как WiFi, GSM, WiMAX, Bluetooth, DSRC, CDMA и APCO-P25 показал, что время живучести сетей определяется большим числом параметров, приведенных в табл. 1. Предел живучести протоколов был определен по дате опубликования методики их взлома, опубликованных в открытых источниках информации: СМИ и сети интернет.

Для определения степени влияния всех представленных в табл. 1 параметров на живучесть необходимо составить сложную систему уравнений связи, ранжировать и определить весовые коэффициенты для каждого параметра, основываясь на мнениях экспертов, и затем получить в аналитическом виде общий показатель живучести системы Q. Такой подход затруднен тем, что для показателей с различной формой представления, которые взаимосвязаны между собой, синтез и анализ конечной модели с требуемой степенью адекватности – трудоемкая математическая задача.

В настоящей работе для ее решения предложено использовать аппарат искусственных нейронных сетей (ИНС), принципы работы которых описаны, например, в работе [5]. С помощью него можно построить модель – сеть; для чего необходимо определить число входных и выходных нейронов, количество скрытых слоев и нейронов в нем, вид активационной функции и определить размер обучающего множества.

Обучение ИНС – это подстройка весовых коэффициентов каждого нейрона. В работе применен метод обратного распространения ошибки, при котором происходит итерационная подстройка весов с последовательным уменьшением ошибки с помощью обучающей выборки. Обучающее множество содержит значения множеств входных параметров и соответствующие им значения выходных параметров.

Наибольшую трудность вызывает определение структуры ИНС и количества нейронов в скрытых слоях.

На основе табл. 1 была составлена обучающая выборка, часть которой представлена в табл. 2. Объем выборки составил 49 наборов данных. Для проведения вычислительных экспериментов в работе была использована программа NeuroPro, которая отличается от универсальных пакетов, таких как Statistica 10 Enterprise или MatLab, узкой специализацией, простым интерфейсом, гибкой настройкой параметров, наличием встроенных средств визуализации и высокой скоростью вычислений. Анализ обучающей выборки с помощью программы NeuroPro подтвердил ее непротиворечивость – отсутствие векторов данных, в которых разным входным параметрам соответствуют разные выходные (в этом случае сеть необучаемая). Для непротиворечивой обучающей выборки теперь необходимо определить минимальное число слоев и нейронов, необходимое для обучения и работы ИНС.

Для решаемой задачи число входов сети составляет 11 шт., один выход – $T_ж$ (в годах), внутренняя структура ИНС определялась экспериментально. Для этого исследовались разные структуры ИНС, содержащие несколько внутренних слоев и несколько нейронов в них с сигмоидальными элементами нелинейности – активационными функциями:

$$F_{акт_i} = \frac{w_{ij}}{c_i + |w_{ij}|},$$

где w_{ij} – весовой коэффициент, соответствующий j-му нейрону i-го слоя, с – параметр крутизны сигмоиды (для эксперимента принято значение 0,9). Результаты настройки и тестирования нескольких наилучших вариантов сетей (успех не менее 85 %) на ЭВМ приведены в табл. 3 для значения достигнутой точности при обучении ± 2 %, которые обозначены в формате $x/y/z/\ldots$, где $x, y, z, \ldots$ – число нейронов в первом (входном), втором, третьем и последующих слоях. В итоге была выбрана конфигурация сети с одним скрытым слоем

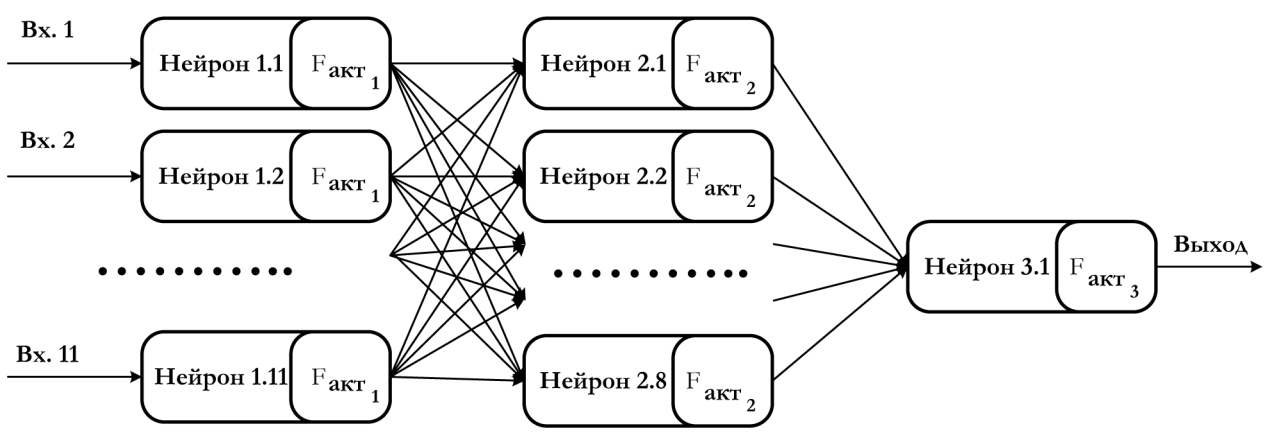

Рис. 1. Полученная топология сети

Таблица 1

Основные параметры протоколов, влияющие на живучесть беспроводных систем связи

Технология / Параметр (номер входа)	GSM (900/1800)	Wifi (802.11/802.11a)	Bluetooth	WiMAX	CDMA	DSRC	APCO-P25
Общее количество каналов (1)	124/374	14/38	79	128, 512, 1024, 2048	64	До 5	512
Используемая полоса частот (2)	(895–915, 935–960) МГц/ (1710–1785, 1805–1880) МГц	(2,4–2,4535) ГГц/(5,15–5,35, 5,65–6,425) ГГц	2,4–2,4835 ГГц	(2,3–2,5) / (3,4–3,5) ГГц	(824–849) / (869 – 894) МГц	5,85–5,925 ГГц	(138–174, 406–512, 746–869) МГц
Мощность базовой станции (3)	2 Вт	2 Вт	100 мВт	2 Вт	2 Вт	100 мВт	100 Вт
Разнос каналов (4)	200 кГц	10 МГц	40–175 кГц	10,94 кГц	45 МГц	7,5 МГц	12,5 кГц
Вид модуляции	GMSK	(DSSS, FHSS) / OFDM	FHSS	OFDMA (SOFDMA)	QPSK	OFDM	C4FM / CQPSK
Тип связи	Цифровая	Цифровая	Цифровая	Цифровая	Цифровая	Цифровая	Аналогово – Цифровая
Идентификация абонента (5)	Жесткий аппаратный ID	Аппаратный MAC и настраиваемый MAC	Аппаратный MAC и настраиваемый MAC	Жесткий аппаратный ID	Жесткий аппаратный ID	Аппаратный MAC и настраиваемый MAC	Жесткий аппаратный ID
Типичный радиус ячейки (6)	1–5 км	300 м	100 м	1–5 км	30 км	300 м	30 км
Зависимость от ландшафта (7)	Слабая/ сильная	Сильная	Сильная	Сильная	Слабая	Сильная	Слабая
Ограничение по доступу (8)	Есть	Нет	Нет	Нет	Есть	Нет	Нет
Область применения связи (9)	Коммерческая	Не коммерческая	Не коммерческая	Коммерческая	Коммерческая	Не коммерческая	Коммерческая
Наличие шифрования (10)	Есть	Есть	Нет	Есть	Есть	Нет	Есть
Оплата за использование (11)	Есть	Нет	Нет	Есть	Есть	Нет	Есть
Время живучести (выход)	(1991–2013) 22 года	(1991–2008) 17 лет	(2002–2006) 4 года	(2001–2005) 4 года	(1998–настоящее время) 25 лет	(2010–настоящее время) 20 лет	(1991–настоящее время) 25 лет

Таблица 2

Фрагмент обучающего множества для настройки ИНС

№	Входы											Выход
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	
1	124	900	2000	200	0	5000	1	1	1	1	1	22
2	374	1700	2000	200	0	4000	2	1	1	1	1	22
3	124	960	2000	200	0	5000	1	1	1	1	1	22
4	14	2400	2000	10000	1	300	2	0	0	1	0	17
5	38	5200	2000	10000	1	300	2	0	0	1	0	17
6	38	5600	2000	10000	1	300	2	0	0	1	0	17
7	38	6000	2000	10000	1	300	2	0	0	1	0	17
8	14	2480	2000	10000	1	300	2	0	0	1	0	17
9	14	2460	2000	10000	1	300	2	0	0	1	0	17
10	79	2400	100	40	1	100	2	0	0	0	0	4
11	79	2480	100	100	1	100	2	0	0	0	0	4
……												

Таблица 3

Результаты отбора наилучших вариантов сетей для точности ±2 %

Вариант ИНС	Циклов обучения	Успешность решения, %	Средняя ошибка	Максимальная ошибка
11/5/1	220	87	2,011	9,39
11/6/1	107	85	2,054	9,46
11/8/1	**52**	**87**	**1,798**	**9,54**
11/9/1	109	87	2,022	9,46
11/10/1	136	87	1,944	9,48
11/11/1	112	87	1,920	9,50
11/12/1	186	87	1,992	9,44
11/13/1	105	87	1,978	9,43

(11/8/1), содержащим 8 нейронов; ее топология изображена на рис. 1. Средствами NeuroPro была выполнена проверка топологии; в результате рекомендовано оставить сеть без изменений. При увеличении количества скрытых слоев росло число циклов обучения при той же вероятности успеха около 87 %.

Теперь, имея настроенную сеть, можно подавать на ее вход параметры протокола связи, планируемого к использованию для подвижного объекта и получать на выходе прогнозируемое значение $T_ж$. Рассчитав экономические параметры системы связи, необходимо соотнести срок окупаемости проекта с полученным временем жизни.

Заключение

В заключении хочется отметить, что предложенный подход не лишен недостатков, обусловленных, прежде всего использованием аппарата искусственных нейронных сетей. Для выбора оптимальной структуры сети требуется время, которое определяется не быстродействием вычислительной техники, а квалификацией человека-оператора. Эффективные автоматические процедуры для такой задачи в настоящее время не разработаны, так как количество внутренних слоев и число нейронов в них не зависят от характеристик входа и выхода сети. Поэтому было бы оправдано для создания универсальных алгоритмов определения живучести сложных систем связи использование сразу нескольких видов моделей: полиномиальной, потоковой и нейросетевой (исследованной в данной работе), с последующими анализом и оптимизацией их параметров (например, см. [1]), но это потребует более сложных процедур принятия решений, а также проведения дополнительных исследований.

Литература

1. Синтез и анализ живучести сетевых систем: монография / Ю.Ю. Громов [и др.]. – М.: «Издательство Машиностроение-1», 2007. – 152 с.

2. Разработка модели угроз информационной безопасности при организации системы связи с наземным подвижным объектом / Л. Чжао [и др.] // Актуальные вопросы науки и техники: Сборник научных трудов по итогам международной научно-практической конференции, Самара, 7 апреля 2015 г. Том II. – Самара, 2015. – С. 194–196.

3. Голуб, Б. В. Методика оценки живучести распределенных информационных систем / Б.В. Голуб, Е.М. Кузнецов, Р.В. Максимов // Вестник СамГУ. Естественнонаучная серия. – 2014. – № 7 (118). – С. 221–232.

4. Стекольников, Ю. И. Живучесть систем / Ю.И. Стекольников. – СПб: Политехника, 2002. – 155 с.

5. Васильев, А. Н. Нейросетевое моделирование. Принципы. Алгоритмы. Приложения / А.Н. Васильев, Д.А. Тархов. – СПб: Изд-во Политехн. ун-та, 2009. – 527 с.