

## ОЦЕНИВАНИЕ ЖИВУЧЕСТИ СИСТЕМ СВЯЗИ ЛИНЕЙНОГО ТИПА С НАЗЕМНЫМИ ПОДВИЖНЫМИ ОБЪЕКТАМИ

ЛЭЙ ЧЖАО, А. Г. КАРМАНОВ, И. Б. БОНДАРЕНКО, К. О. ТКАЧЕВ

*Университет ИТМО, 197101, Санкт-Петербург, Россия  
E-mail: zl\_2321@hotmail.com*

Представлен алгоритм оценивания живучести систем связи линейного типа с множеством подвижных объектов. Особое внимание уделено основному показателю живучести систем связи — плотности распределения пользователей. Разработана математическая модель системы связи линейного типа и приведены результаты эксперимента.

**Ключевые слова:** *подвижный объект, зона покрытия, количество занятых каналов, живучесть систем связи*

**Введение.** При разработке открытых систем связи на основе беспроводных протоколов с множеством наземных объектов предполагается, что на компоненты системы оказывают влияние внешние факторы, соответствующие нормальным условиям ее эксплуатации с учетом коэффициентов запаса. Степень избыточности объектов определяется субъективно и зависит от уровня квалификации и опыта разработчика. При эксплуатации таких систем энергетические и информационные воздействия ( $E_b$ ) могут превысить предельно возможный уровень ( $E_{пр}$ ), вследствие чего компоненты сложной системы (один или несколько) перестанут выполнять свои локальные функции, а система — глобальную функцию. Поведение сложной системы и характер разрушений при воздействии на нее дестабилизирующих факторов как со стороны внешней среды, так и в результате действий злоумышленника зависит от степени живучести. Разрушение компонентов сложной системы может привести к катастрофическим последствиям, что, в свою очередь, вызовет каскадный эффект с возрастающим ущербом. Поэтому определение видов внешних дестабилизирующих воздействий и прогнозирование их уровней является актуальной задачей, возникающей при проектировании систем связи с наземными объектами.

**Постановка задачи.** Живучесть системы связи [1], в данном случае время до официального факта взлома ( $T_{ж}$ ), в зависимости от типа беспроводного протокола радиосвязи [2] можно определить, используя аппарат искусственных нейронных сетей, по алгоритму, описанному в работе [3]. В этой работе показано также, что структурную живучесть сети характеризует связность графа  $G$  — ее модели. Однако при этом не учитывалось, что, во-первых, при отказе одного узла сети  $S_k$  происходит перераспределение потоков информации и энергии между другими узлами  $S_i$ ,  $i \neq k$ , и соответственно при росте нагрузки  $E_b > E_{пр}$  и сеть теряет связность; во-вторых, не учитывалась также мощность графа.

В настоящей статье рассматривается следующая задача. Имеется некоторое множество размещенных одна за другой базовых станций (БС) в системах связи. Структура линейной закрытой системы сотовой связи (GSM, CDMA, WiMAX) представлена на рис. 1. Каждая

зона покрытия  $H_i$  характеризуется максимально возможным числом каналов  $S_{\max}$ , а следовательно, максимальной плотностью распределения абонентов. При превышении величины  $S_{\max}$  произойдет отказ в обслуживании абонентов. Так как объекты (пользователи) могут перемещаться внутри зоны, а также из одной зоны в другую, количество узлов отдельно взятой БС — величина переменная.

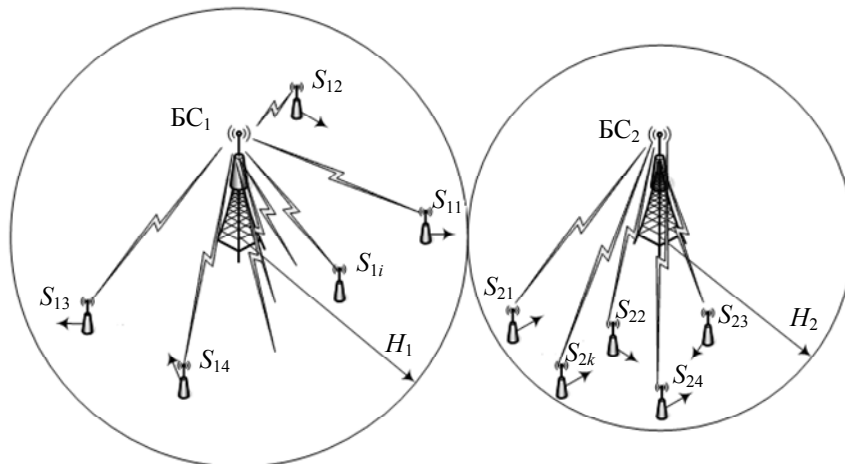


Рис. 1

Другая картина наблюдается в открытых системах связи (Wi-Fi, DSRC), а также в микросотовых и сенсорных сетях (рис. 2) [4]. В этом случае абоненты (узлы  $S_1$ — $S_4$ ) могут связываться между собой. Поскольку количество каналов ограничено, то при меньшей плотности распределения абонентов, по сравнению с предыдущим случаем, может наступить переполнение сети. При передаче информации от одного источника разным абонентам сети может произойти конфликтная ситуация (см. рис. 2), т.е. возникает дилемма: от какого узла —  $S_2$  или  $S_3$  — должен принимать сигнал узел  $S_4$ .

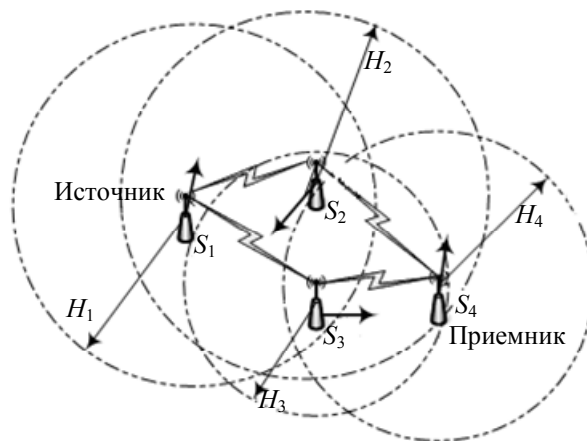


Рис. 2

При варианте с закрытыми системами (см. рис. 1) в БС имеется возможность ограничения количества абонентов в зоне покрытия  $H_i$  и количества передаваемой информации (трафика). Так как БС в этом случае являются стационарными, то расчет необходимой зоны покрытия и выбор частотного канала — задачи, решаемые для каждого конкретного ландшафта. Живучесть закрытых систем связи достаточно высокая [5] и определяется плотностью распределения абонентов в зоне  $H_i$ .

В открытых системах связи с подвижными объектами (см. рис. 2) не представляется возможным ограничить количество соединений, а следовательно, плотность распределения абонентов может стремительно вырасти, достигнув критической величины. Принимающие/передающие станции не имеют привязки к местности, соответственно зона покрытия  $H_i$

может динамически изменяться в зависимости, например, от ландшафта [6]. В таких системах отсутствует возможность отключения канала связи при перегрузке; увеличение зоны охвата приводит к тому, что сигналы связи легче перехватить или заглушить. При увеличении числа подвижных объектов (пользователей) стремительно возрастает вероятность отказа в обслуживании, а живучесть снижается.

Перечисленные аспекты и являются основой для решения рассматриваемой задачи.

**Методы решения и полученные результаты.** Для структуры сети, показанной на рис. 1, необходимость ограничения числа пользователей определяется выполнением условия невыполнения максимальной плотности абонентов ( $\rho_{\max}$ ) в зоне покрытия  $H$  для любой базовой станции:

$$\frac{N}{\pi H^2} < \rho_{\max}, \quad (1)$$

где  $N$  — количество узлов сети, работающих в зоне охвата данной БС.

Так как

$$\rho_{\max} = \frac{S_{\max}}{\pi H^2}, \quad (2)$$

то условие (1) преобразуется к виду

$$N < S_{\max}. \quad (3)$$

При нарушении условия (3) произойдет отказ в обслуживании БС системы связи.

Для беспроводных сетей открытой системы связи линейного типа при условии, что в зоне действия каждой БС находятся  $n$ ,  $k$ ,  $l$  и  $m$  активных пользователей (узлы  $S_{11}$ ,  $S_{21}$ ,  $S_{31}$ ,  $S_{41}$  — см. рис. 3), можно записать:

$$\left. \begin{aligned} \rho_1 &= \frac{n+1}{\pi H_1^2} < \rho_{\max}; \\ \rho_2 &= \frac{k+2}{\pi H_2^2} < \rho_{\max}; \\ \rho_3 &= \frac{l+2}{\pi H_3^2} < \rho_{\max}; \\ \rho_4 &= \frac{m+1}{\pi H_4^2} < \rho_{\max}. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

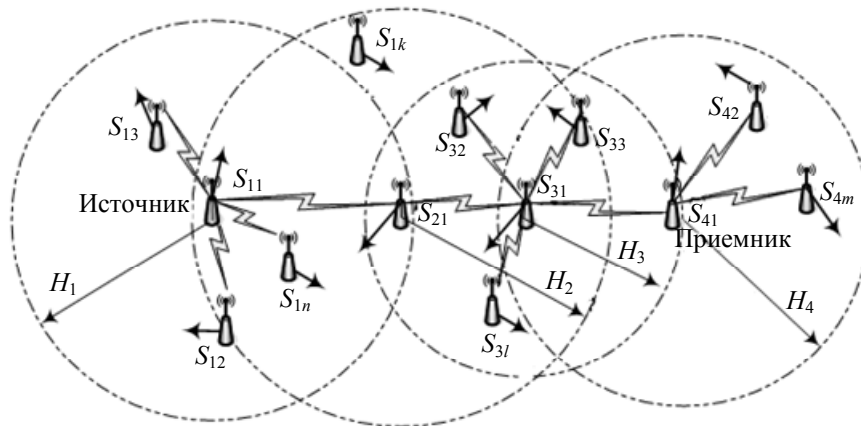


Рис. 3

В системе уравнений (4) принято допущение, что активные пользователи первого кластера не „расходуют“ каналы соседних кластеров, находящихся в их зоне приема (например, узел  $S_{32}$  находится в зоне доступа узла  $S_{21}$  и т.д.; в принципе все кластеры могут оказаться

в зоне покрытия, допустим, станции  $S_{11}$ ). На практике узлы могут находиться в зоне двух соседних станций (рис. 4, а): в этом случае они занимают дополнительно еще по одному каналу ( $a, b, c$  на рис. 5) у соседних БС. Узлы, находящиеся в зоне сразу трех БС (рис. 4, б), занимают по два дополнительных канала ( $d, e$  на рис. 5) у соседних станций, а узлы, находящиеся в зоне четырех БС (рис. 4, в), — по три канала ( $g$  на рис. 5).

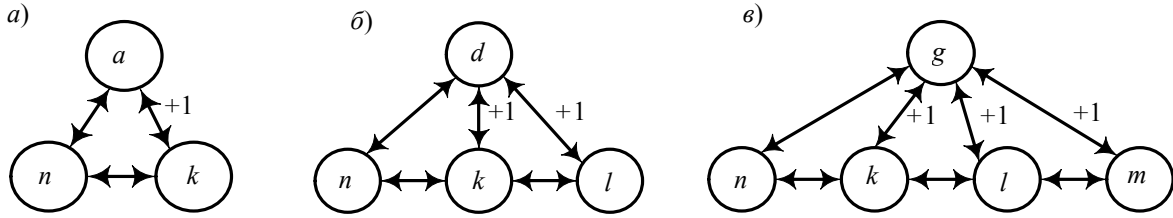


Рис. 4

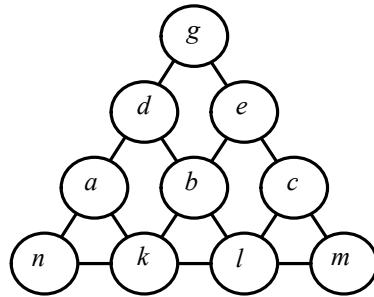


Рис. 5

В результате система уравнений (4) изменится следующим образом (при условии, что дополнительные каналы заимствуются у БС, находящихся правее источника, — см. рис. 3):

$$\left. \begin{aligned} \rho_1 &= \frac{n+1}{\pi H_1^2} < \rho_{\max}; \\ \rho_2 &= \frac{k+2+a+d+g}{\pi H_2^2} < \rho_{\max}; \\ \rho_3 &= \frac{l+2+b+d+e+g}{\pi H_3^2} < \rho_{\max}; \\ \rho_4 &= \frac{m+1+c+e+g}{\pi H_4^2} < \rho_{\max}. \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

Используя выражение (2), получим математическую модель для линейной сети открытой системы связи „источник—приемник“ с двумя промежуточными узлами:

$$\left. \begin{aligned} n+1 &< S_{\max}; \\ k+2+a+d+g &< S_{\max}; \\ l+2+b+d+e+g &< S_{\max}; \\ m+1+c+e+g &< S_{\max}. \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

Анализируя модель (6), можно сделать следующий вывод. Добавление мобильных узлов к сети (см. рис. 3) может привести к тому, что информация от источника к приемнику по причине отсутствия свободных каналов не сможет дойти. При этом увеличение числа занятых каналов  $n, k, l$  и  $m$  приведет к медленному снижению живучести сети, а добавление каналов  $a, b, c, d, e, g$  — к стремительному снижению (см. рис. 5 — чем выше по пирамиде, тем быстрее). Анализ модели (6) показывает также, что БС источника будет загружаться медленнее,

чем промежуточные БС и приемник в случае подключения абонентов, использующих сразу несколько станций. В модели (6) не учитывается вариант, когда происходит превышение величины  $S_{\max}$  для БС, не участвующих в передаче информации от источника к приемнику.

Полученную модель можно исследовать с помощью имитационного компьютерного эксперимента.

**Эксперимент.** Авторами настоящей статьи на основе системы уравнений (5) был разработан алгоритм, структурная схема которого представлена на рис. 6. Для задания координат узлов связи в работах [7, 8] использовалось распределение Пуассона. При разработке алгоритма генерация узлов связи и их координат производилась с помощью датчика случайных чисел, что позволило воссоздать стохастический характер появления новых абонентов. Поэтому распределение по типам узлов связи также случайное. Движение узлов связи не моделировалось, а также не учитывался ландшафт. В качестве примера был выбран протокол Wi-Fi 802.11, для которого  $S_{\max} = 14$ , зоны покрытия приняты одинаковыми, т.е.  $H_i = 300/2 = 150$  м. Число абонентов, полученное посредством генерации случайным образом, равнялось 30. Для определения расстояний, например, между источником и объектом (или между двумя объектами) использовалась евклидова метрика:

$$r(X, Y) = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2}.$$

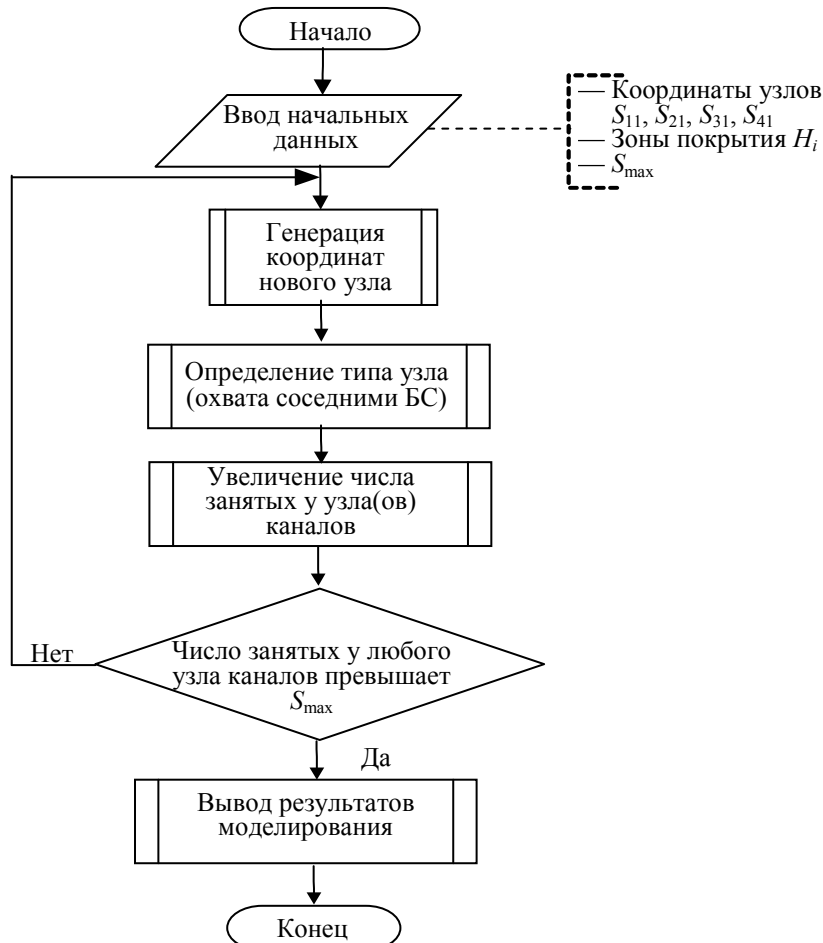


Рис. 6

Результаты работы программы по представленному алгоритму приведены в таблице, анализ которой позволяет сделать вывод о корректности рассмотренной математической модели для линейной системы связи открытого типа.

Номер эксперимента	Протяженность линии связи, м	Количество пользователей	Число занятых каналов, находящихся в зоне покрытия				Превышение $S_{max}$
			одной БС	двух БС	трех БС	четырёх БС	
1	360	20	23	7	0	0	Нет
2			28	9	0	0	Нет
3			29	9	2	0	Нет
4			30	10	1	0	Нет
5			30	10	2	0	Есть
6			30	11	1	0	Есть
7			32	12	2	0	Есть
8			32	12	3	0	Есть
9			33	14	4	0	Есть
10	300	20	23	8	2	0	Нет
11			24	9	1	0	Нет
12			25	8	2	0	Нет
13			25	9	2	0	Нет
14			26	10	0	0	Нет
15			26	11	2	0	Есть
16			27	9	2	0	Есть
17			27	10	1	0	Нет
18			28	10	1	0	Есть
19			28	10	2	0	Нет
20			28	12	2	0	Есть
21			29	10	0	0	Нет
22			29	11	2	0	Есть
23			29	12	4	0	Есть
24	29	13	2	0	Есть		
25	200	20	24	12	7	2	Есть
26			29	13	3	1	Есть
27			39	22	9	1	Есть
28		15	15	5	2	0	Нет
29			16	5	0	0	Нет
30			18	7	2	0	Нет
31			18	9	5	1	Есть
32			19	8	2	0	Нет
33			20	7	2	0	Нет
34			20	8	3	0	Нет
35			21	9	4	0	Нет
36			23	9	3	0	Нет
37			24	11	4	0	Есть

**Заключение.** Согласно результатам эксперимента, предсказать количество узлов связи, при котором наступит отказ в обслуживании линейной сети открытой системы связи, на практике затруднительно.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Махутов Н. А., Петров В. П., Резников Д. О. Оценка живучести сложных технических систем // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. 2009. № 3. С. 47—66.
2. Чжао Л., Карманов А. Г., Бондаренко И. Б., Ткачев К. О. Разработка модели угроз информационной безопасности при организации системы связи с наземным подвижным объектом // Актуальные вопросы науки и техники: Сб. науч. тр. по итогам Междунар. науч.-практ. конф., 7 апр. 2015 г. Самара. 2015. Т. II. С. 194—196.
3. Чжао Л., Карманов А. Г., Бондаренко И. Б., Ткачев К. О. Оценка живучести сложных информационных систем связи с подвижными объектами // Информатика и космос. 2015. № 3. С. 36—41.
4. Трифонов С. В., Холодов Я. А. Исследование и оптимизация работы беспроводной сенсорной сети на основе протокола ZigBee // Компьютерные исследования и моделирование. 2012. Т. 4, № 4. С. 855—869.
5. Синтез и анализ живучести сетевых систем: монография / Ю. Ю. Громов, В. О. Драчев, К. А. Набатов, О. Г. Иванова. М.: Машиностроение-1, 2007. 152 с.
6. Маковеева М. М., Шинаков Ю. С. Системы связи с подвижными объектами: Учеб. пособие для вузов. М.: Радио и связь, 2002. 440 с.
7. Хрусталева Д. А. Новейшее руководство по сотовой связи. М.: СОЛОН-Пресс, 2004. 176 с.
8. Голуб Б. В., Кузнецов Е. М., Максимов Р. В. Методика оценки живучести распределенных информационных систем // Вестн. СамГУ. Естественно-научная серия. 2014. № 7(118). С. 221—232.

**Сведения об авторах**

- Лэй Чжао** — аспирант; Университет ИТМО; кафедра геоинформационных систем; E-mail: zl\_2321@hotmail.com
- Андрей Геннадьевич Карманов** — канд. техн. наук, доцент; Университет ИТМО; кафедра геоинформационных систем; E-mail: karmanov.nip@gmail.com
- Игорь Борисович Бондаренко** — канд. техн. наук, доцент; Университет ИТМО; кафедра проектирования и безопасности компьютерных систем; E-mail: igorlitmo@rambler.ru
- Константин Олегович Ткачев** — Университет ИТМО; кафедра проектирования и безопасности компьютерных систем; старший преподаватель; E-mail: kottok1@yandex.ru

Рекомендована кафедрой  
геоинформационных систем

Поступила в редакцию  
28.10.15 г.

**Ссылка для цитирования:** Чжао Лэй, Карманов А. Г., Бондаренко И. Б., Ткачев К. О. Оценивание живучести систем связи линейного типа с наземными подвижными объектами // Изв. вузов. Приборостроение. 2016. Т. 59, № 3. С. 173—180.

**SURVIVABILITY ASSESSMENT FOR COMMUNICATION SYSTEM OF LINEAR TYPE  
WITH MOBILE GROUND UNITS**

**Lei Zhao, A. G. Karmanov, I. B. Bondarenko, K. O. Tkachev**

*ITMO University, 197101, St. Petersburg, Russia  
E-mail: zl\_2321@hotmail.com*

An algorithm is proposed for survivability assessment of communication system of linear type with a large number of mobile ground units. A special attention is paid to the key indicator of communication system survivability – the system users' density. A mathematical model of communication system of linear type is developed; results of experimental testing are presented.

**Keywords:** mobile unit, coverage area, zone, number of occupied channels, communication system survivability

**Data on authors**

- Lei Zhao** — Post-Graduate Student; ITMO University, Department of Geoinformation Systems; E-mail: zl\_2321@hotmail.com
- Andrey G. Karmanov** — PhD, Associate Professor; ITMO University, Department of Geoinformation Systems; E-mail: karmanov.nip@gmail.com
- Igor B. Bondarenko** — PhD, Associate Professor; ITMO University, Department of Computer System Design and Security; E-mail: igorlitmo@rambler.ru
- Konstantin O. Tkachev** — ITMO University, Department of Computer System Design and Security; Senior Lecturer; E-mail: kottok1@yandex.ru

**For citation:** Zhao Lei, Karmanov A. G., Bondarenko I. B., Tkachev K. O. Survivability assessment for communication system of linear type with mobile ground units // Izv. vuzov. Priborostroenie. 2016. Vol. 59, N 3. P. 173—180 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2016-59-3-173-180