

## МЕТОД АНАЛИЗА УСТОЙЧИВОСТИ ПРОСТРАНСТВЕННО-РАСПРЕДЕЛЕННЫХ РАЗНОРОДНЫХ СЕТЕЙ РАДИОСВЯЗИ

С.С. Веркин, канд. техн. наук, преподаватель

Военная академия связи им. Маршала Советского Союза С.М. Буденного  
(Россия, г. Санкт-Петербург)

DOI:10.24412/2500-1000-2025-3-1-207-213

**Аннотация.** Представлен метод оценки устойчивости пространственно-распределенных разнородных сетей радиосвязи на примере сети многоканальной радиосвязи в условиях противодействия деструктивным факторам путем управления распределением защитного ресурса сети. Метод основан на методе двух функций и последовательных приращений и позволяет в наихудших условиях достигнуть потенциальных возможностей по обеспечению устойчивости сети.

**Ключевые слова:** сеть многоканальной радиосвязи, устойчивость, морфологические параметры сети, деструктивные факторы, структура сети.

Современная сеть связи – это сложная иерархическая структура, состоящая из узлов коммутации и разнородных линий связи, соединяющих их. В современных условиях, при развертывании ее полевой компоненты, ведущая роль принадлежит линиям многоканальной радиосвязи (МКРС), построенным средствами радиорелейной, тропосферной и спутниковой связи, размещенными в космическом, воздушном, наземном и морском эшелонах.

Благодаря своей разветвленности и гибкости каналов, сеть МКРС обладает высокой устойчивостью к внутренним воздействиям. Средства связи в этой сети отличаются высокой мобильностью, многонаправленностью, большой частотной ёмкостью и пропускной способностью, а также высоким качеством каналов. Кроме того, она имеет сравнительно низкую стоимость [1, 2].

Открытость среды распространения радиоволн в линиях МКРС способствует негативному воздействию внешних деструктивных факторов, которое ухудшает устойчивость сети МКРС. Деструктивные факторы (ДСФ) – процесс воздействия источника физической или технологической природы, внешнего характера по отношению к сети, приводящий к выходу из строя элементов сети. Внешние факторы включают в себя: воздействие преднамеренных и непреднамеренных помех; физико-географические условия в местах развертывания сети; природные и техногенные катастрофы. В настоящее время значительно

возрастает угроза преднамеренного внешнего воздействия на сети связи с целью затруднения или срыва передачи управляющей информации, а следовательно, на первый план выдвигается характеристика устойчивости сети, оценка которой представляет собой весьма актуальную задачу.

Под устойчивостью сети будем понимать ее способность выполнять свои функции при выходе из строя части элементов в результате воздействия ДСФ [3, 4]. При этом выполнение функций обеспечивается реализацией управляющих решений.

В настоящее время существует множество моделей оценки устойчивости сложных сетей связи, реализующих следующие основные методы.

Метод, основанный на интегральных свойствах устойчивости, в котором устойчивость представляется собой живучесть, надежность и помехоустойчивость. Поэтому устойчивость определяется как мультипликативная свертка вероятностей её составляющих.

Методы, основанные на использовании математического аппарата теории графов и нахождения связности между элементами сети. При этом устойчивость оценивается вероятностями сохранения работоспособности (связности) на определенном направлении связи (НС) при соблюдении требований по пропускной способности (сохранения требуемого числа линий связи).

Метод оценки устойчивости с помощью Марковского процесса. При этом под устой-

чивостью сети будем понимать способность сети передавать информацию с заданной своевременностью. Сущность метода состоит в том, что сеть связи определяется как совокупность состояний, различающихся между собой степенью воздействия ДСФ.

Однако, общим их недостатком является отсутствие аналитической взаимосвязи морфологических показателей сети (связности сети, весов интервалов, линий и направлений связи) и показателей воздействия ДСФ в одной математической модели.

Поэтому материал статьи будет посвящен вопросу разработки метода определения значения устойчивости сети МКРС и нахождения рационального варианта распределения ресурса сети в условиях воздействия ДСФ с целью повышения ее значения.

#### **Актуальность исследования**

Спецификой мобильной сети МКРС является ее функционирование в условиях воздействия ДСФ [1], поэтому на первый план вы-

двигается характеристика устойчивости сети. С целью повышения устойчивости путем распределения ресурса сети МКРС необходимо прогнозировать стратегию воздействия ДСФ (определение порядка закрепления средств ДСФ за элементами сети). В настоящее время существует большое количество методов нахождения распределения ресурса средств сети. Однако, общим их недостатком является отсутствие анализа возможности защиты сети от максимального воздействия ДСФ в условиях неопределенности при ограничении ресурса сети, что несомненно подчеркивает актуальность данной работы.

#### **Физическая постановка задачи**

Имеется  $X$  вариантов распределения ресурса, с целью защиты сети МКРС, каждый из которых включает  $N$  направлений связи (НС). Возможности воздействия на  $n$ -ое НС ( $n = \overline{1, N}$ ) каждой структуры  $\nu$ -м средством ДСФ зададим матрицей:

$$\square P_{\text{ущ.НС}_{\nu n}} \square_{\nu N},$$

где  $\nu = \overline{1, V}$  – номер средства воздействия ДСФ;  $P_{\text{ущ.НС}_{\nu n}} = 1 - P_{\text{у.НС}_{\nu n}}$  – вероятность ущерба  $n$ -ого НС  $\nu$ -м средством ДСФ;  $P_{\text{у.НС}_{\nu n}}$  – вероятность устойчивости  $n$ -ого НС в условиях воздействия  $\nu$ -ого средства ДСФ.

Необходимо определить порядок распределения ресурса сети для противодействия ДСФ, чтобы максимально увеличить вероятность ее устойчивости.

$$P_{\text{у.НС}} = 1 - \prod_{j=1}^J \left[ 1 - \prod_{i=1}^I \prod_{k=1}^2 \left( 1 - \prod_{r=1}^R \left( 1 - \delta^{(kr)} \left( 1 - \beta^{(kij)} \right) P_{\text{у.Ср}}^{(kij)} \right) \right) \right], \quad (1)$$

где  $i = \overline{1, I}$  – интервалы линии связи;  $j = \overline{1, J}$  – линии передачи в НС сети МКРС;  $n = \overline{1, N}$  – количество НС в сети;  $\beta^{(k)}$  – вероятности доступности ДСФ к  $k$ -ому элементу сети;  $\delta^{(kr)}$  – наличие связности  $k$ -ого средства с другими

#### **Содержательная постановка задачи**

Для оценки устойчивости сети МКРС используем модель, учитывающую воздействие ДСФ и взаимосвязь показателя воздействия и структурных показателей сети, включающих количество НС, линий связи и интервалов связи, их связность и вес в сети. При этом вероятность устойчивости НС определяется формулой [3]:

средствами в сети;  $R$  – ресурс средства сети;  $P_{\text{у.Ср}}^{(k)}$  – вероятность устойчивости  $k$ -ого средства;  $P_{\text{у.НС}}$  – вероятность устойчивости НС.

Степень ущерба НС сети от воздействия ДСФ определим по формуле:

$$P_{\text{ущ.НС}} = 1 - P_{\text{у.НС}}$$

Факт назначения  $\nu$ -го средства для воздействия по  $n$ -му НС фиксируется индикатором

$z_{\nu n} = 1$  ( $z_{\nu n} = 0$  – в противном случае), где  $\nu$  – номер средства воздействия. Матрица назначе-

ний  $\|z_{vn}\|_{TN}$  содержит в себе указания о закреплении средства ДСФ. С учетом важности

НС в информационном обмене степень ущерба сети определяется формулой [3]:

$$P_{\text{ущ.Сеть}} = \sum_{n=1}^N \alpha_n (1 - P_{y, \text{НС}_{vn}}), \quad (2)$$

где  $\alpha_n$  – важность  $n$ -ого НС сети МКРС.

При условии независимости средств воздействия выражение (2) примет вид:

$$F(z_{vn}) = P_{\text{ущ.Сеть}} = \sum_{n=1}^N \alpha_n \left( 1 - \prod_{v=1}^V P_{y, \text{НС}_{vn}}^{z_{vn}} \right), \quad (3)$$

при ограничениях:  $\sum_{n=1}^N z_{vn} = 1; z_{vn} \in \{0, 1\}$ .

Для решения задачи требуется найти такое распределения ресурса сети МКРС по ее элементам, чтобы при наихудших внешних усло-

виях ДСФ обеспечить наилучшую устойчивость сети. Таким образом, задача сводится к нахождению гарантированной устойчивости, выраженной функционалом:

$$\Psi(X, V) = \max_X \min_V P_{y, \text{Сеть}} \quad (4)$$

$\Psi(X, V)$  может быть эквивалентен  $F(X, V)$ , который представлен следующим функционалом:

$$F(X, V) = \min_X \max_V P_{\text{ущ.Сеть}}, \quad (5)$$

Из формулы (5) вытекают два этапа нахождения гарантированного решения проблемы устойчивости:

1. Определение распределения средств воздействия на элементах сети для максимизации ущерба (минимизации устойчивости).

2. Уменьшение ущерба сети (повышение устойчивости) путем распределения ресурса сети МКРС.

### **Решение задачи распределения средств ДСФ на элементы сети МКРС**

Для максимизации ущерба с помощью метода двух функций [4]. Для этого каждое  $v$ -ое средство характеризуется своей ( $v$ -й) известной степенью ущерба  $P_{y, \text{НС}_{vn}}$ , которая задается матрицей  $\|P_{y, \text{НС}_{vn}}\|_{VN}$ .

Значения приращения ущерба сети МКРС при переходе с  $t-1$  к  $t$ -му шагу распределения средств ДСФ определяется формулой:

$$\Delta_t^+ = F_t^+ - F_{t-1}^+ = \alpha_t P_{y, \text{НС}_t}^{(t-1)} (1 - P_{y, \text{НС}_t}^{(t)}), \quad (6)$$

В качестве ограничений необходимо отметить, что закрепляя средство воздействия за НС, его уже невозможно использовать в дальнейшем для другого НС.

Потери  $F(z_{vn})$  от неправильного распределения средств возникают за счет воздействия нераспределенных средств ДСФ, так как после назначения  $h$ -го средства на  $n$ -ое НС потери вычисляются как разность ущерба сети всеми нераспределенными средствами и

ущерба теми же средствами, кроме  $h$ -го, назначенное на  $n$ -ое НС. Для оценки потерь определим выражение – неположительное приращение  $(-\Delta_t^-)$ . Положим, что к  $t$ -му шагу каждое НС выходит из строя с вероятностью  $P_{y, \text{НС}_n}^{(t-1)} = 1 - P_{y, \text{НС}_n}^{(t)}$ . Вероятность ущерба  $n$ -му НС к моменту назначения  $t$ -й единицы средства воздействия ДСФ определяется формулой:

$$F_{t-1}^- = \sum_{n=1}^N \alpha_n \left( 1 - P_{y.HC_n}^{(t-1)} \prod_{v \in V(t)} P_{y.HC_{vn}} \right),$$

где  $V(t)$  – множество нераспределенных средств до  $t$ -го шага.

Тогда, после назначения  $h$ -го средства по  $l$ -му НС функция потерь примет вид:

$$F_t^- = \sum_{\substack{n=1 \\ n \neq l}}^N \alpha_n \left( 1 - P_{y.HC_n}^{(t-1)} \prod_{\substack{v \in V(t) \\ v \neq h}} P_{y.HC_{vn}} \right) + \alpha_l \left( 1 - P_{y.HC_l}^{(t-1)} \prod_{v \in V(t)} P_{y.HC_{vl}} \right)$$

Тогда потери от неправильного распределения средств воздействия

$$-\Delta_{hl}^- = F_t^- - F_{t-1}^-$$

Окончательное выражение для снижения прироста степени ущерба сети МКРС определяется формулой:

$$-\Delta_{hl}^- = -\sum_{\substack{n=1 \\ n \neq l}}^N \alpha_n \frac{P_{y.HC_n}^{(t-1)} P_{y.HC_{hm}}}{P_{y.HC_{hm}}} \prod_{v \in V(t)} P_{y.HC_{vm}}. \quad (7)$$

Критерием назначения  $h$ -го средства воздействия ДСФ на  $l$ -ое НС сети МКРС является:

$$\Delta_{hl} = \max_{h,l} (\Delta_{hl}^+ - \Delta_{hl}^-) = \max_{h,l} \left[ \alpha_l P_{y.HC_l}^{(t-1)} (1 - P_{y.HC_l}^{(t)}) - \sum_{\substack{n=1 \\ n \neq l}}^N \alpha_n \frac{P_{y.HC_n}^{(t-1)} P_{y.HC_{hm}}}{P_{y.HC_{hm}}} \prod_{v \in V(t)} P_{y.HC_{vm}} \right], \quad (8)$$

где  $k \in N(t)$ ;  $n, l = \overline{1, N}$ .

На основе критерия (8) можем определить максимальное воздействие ДСФ (максимальное приращение ущерба сети при рациональном распределении средств ДСФ), с учетом этого находится гарантированная устойчивость путем распределения ресурса сети.

#### Решение задачи распределения ресурсов сети МКРС

С помощью метода последовательных приращений [4]. С целью противодействия ДСФ и восстановления устойчивого функционирования сети МКРС осуществляется управление сетью, которое заключается в воздействии органов управления на элементы сети путем распределения имеющегося ресурса. При

этом возникает задача распределения ресурса сети с помощью метода последовательных приращений, путем замены функции нормированной устойчивости НС сети выпуклыми оболочками  $F_n(x_n)$  с последующей максимизацией функции  $F(X)$  методом максимального элемента [4, 5].

Имеется  $n$  НС сети МКРС, приращение устойчивости  $n$ -ого НС осуществляется за счет применения на нем части ресурса  $x_n$ , под которыми будем понимать меры защиты сети. Предположим, что приращение устойчивости определенного НС не зависит от применения ресурса в других НС. Оптимальное распределение ресурса, ограниченного сверху величиной  $b$ , между НС определяется формулой:

$$F(X) = \sum_{n=1}^N F_n(x_n) \rightarrow \max_X, \quad (9)$$

при

условии  $\left( X = \sum_{n=1}^N x_n \right) \leq b, b \in \{0, 1, 2, \dots\}$ ,  $b$  – величина, ограничивающая общий ресурс;  $x_n = \overline{1, b}, n = \overline{1, N}$ .

ограничений:

Для оптимизации используем процесс последовательного распределения ресурса частями  $\Delta x_n^{(t)}$  на  $t$ -м шаге процесса, при этом, доля используемого ресурса  $x_n$  может быть

представлена суммой частей ресурса  $\sum_{t=1}^d \Delta x_n^{(t)}$  за все  $d$  шагов.

Оптимальная (максимальная) величина приращения аргумента  $x_n$  определяется усло-

$$g_n^{(t_m)} = \max_{\Delta x_n} \left( \frac{\Delta F_n^{(t)}}{\Delta x_n^{(t)}} \right),$$

где  $\Delta x_n^{(t)}$ ,  $\Delta x_n^{(t_m)}$  – приращение ресурса и его максимальное значение на  $t$ -м шаге процесса;  $0 < \Delta x_n^{(t)} \leq b$ ;  $g_n^{(t)}$ ,  $g_n^{(t_m)}$  – средний прирост функции приращения устойчивости  $n$ -ого НС из  $\Delta x_n^{(t)}$  единиц ресурса на  $t$ -м шаге процесса и его максимальное значение;  $\Delta F_n^{(t)}$  – прирост

вием, в котором средний прирост функции приращения устойчивости  $n$ -ого НС был максимальным. Оптимальная величина шага  $\Delta x_n^{t_m}$  определяется условиям:

функции приращения устойчивости  $n$ -ого НС на  $t$ -м шаге процесса.

При этом максимальное значение приращения устойчивости можно записать в виде [5]:

$$F(X_0) = \max_X \sum_{n=1}^N F_n(x_n) = \max_{\Delta x_n, n} \sum_{n=1}^N \sum_{t=1}^d g_n^{(t)} \Delta x_n^{(t)} = \sum_n \sum_t g_n^{(t_m)} \Delta x_n^{(t_m)} \quad (10)$$

Таким образом, формула (10) позволяет получить приближенное решение задачи для максимизации устойчивости в условиях фиксированных воздействий ДСФ.

Предполагая, что величины значения устойчивости на  $n$ -ом НС сети МКРС представлены в таблице 1, определим зависимость

значения приращения устойчивости от ресурса сети. На этом примере под единицей ресурса  $x_n$  будем понимать количество средств помехозащиты сети в условиях воздействия ДСФ, которое соответствует значению среднего времени защиты  $\tau$ .

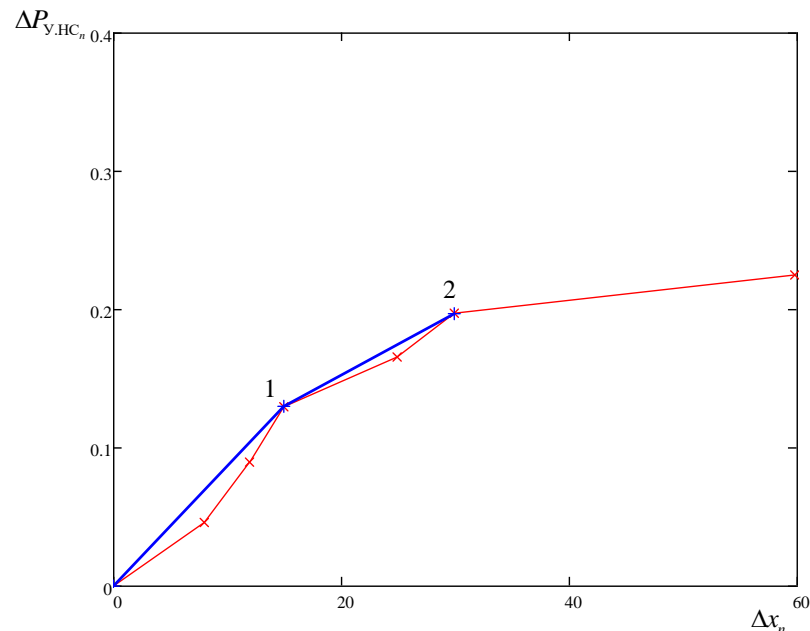


Рис. 1. Зависимость приращения устойчивости  $n$ -ого НС от ресурса сети МКРС

Таблица 1. Параметры для определения зависимости приращения устойчивости от ресурса сети

$\tau$ (минут)	0	10	20	30	40	50	60
$\beta(\tau)=0.5e^{\frac{-\tau}{60}}$	0.5	0.423	0.358	0.203	0.257	0.217	0.184
$P_{у.НС}$	0.143	0.189	0.233	0.273	0.309	0.34	0.368
$F_n(x_n) = \Delta P_{у.НС_n}$	0	0.046	0.09	0.13	0.166	0.197	0.225
$\Delta x_n$	0	8	12	15	25	30	60

Идея решения состоит в оптимизации выпуклыми оболочками с шагами по сопряженным точкам (обеспечивать ускоренное увеличение приращения устойчивости до максимума путем перешагивания несопряженных точек). Предполагая, что значение доступности воздействия ДСФ к элементам сети в формуле (1) уменьшается с распределением ресурса по экспоненциальному закону. При этом построена зависимость приращения устойчивости НС от ресурса сети МКРС, которая представлена в рисунке 1, где точка 1 и 2 являются сопряженными точками.

### Заключение

Ресурс сети МКРС распределяется таким образом, чтобы в наихудших внешних условиях обеспечить наилучшую вероятность устойчивости сети. В соответствии с вышеизложенным, процесс максимизации функции устойчивости осуществляется в два этапа и продолжается до тех пор, пока устойчивость не достигает соответствия требуемому значению, обусловленному потенциальными возможностями сети.

### Библиографический список

1. Якушенко С.А., Сазонов М.А., Бибарсов М.Р. Радиорелейные и спутниковые системы передачи специального назначения. Часть 1: Учебник. В 2-х частях / Под ред. С.А. Якушенко. – СПб.: ВАС, 2016. – 486 с.
2. Якушенко С.А., Сазонов М.А. Методология создания перспективных средств многоканальной радиосвязи на новых технических принципах // Успехи современной радиоэлектроники. – 2016. – № 11. – С. 18-24.
3. Исаков Е.Е. Устойчивость военной связи в условиях информационного противоборства. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2009. – 400 с.
4. Снежко В. К. Методика оценки устойчивости сетей многоканальной радиосвязи. – СПб.: ВАС, 1987. – 127 с.
5. Берзин Е.А. Оптимальное распределение ресурсов и элементы синтеза систем // Под. ред. Е.В. Золотова. – М.: «Сов. радио», 1974. – 304 с.
6. Концыняк М.А., Якушенко С.А., Веркин С.С., Дворовой М.О. Теория и практика защиты многоканальных сетей радиосвязи от системы комплексного воздействия. Часть 1. Модель противоборства систем воздействия и связи. – ВАС, 2007. – 76 с.

**METHOD OF ANALYSIS OF STABILITY OF SPATIALLY DISTRIBUTED  
HETEROGENEOUS RADIO COMMUNICATION NETWORKS**

**S.S. Verkin**, *Candidate of Technical Sciences, Lecturer*

**Military Academy of Communications named after Marshal of the Soviet Union S.M. Budyonny**  
(Russia, St. Petersburg)

***Abstract.** The article presents a method for assessing the stability of spatially distributed heterogeneous radio networks using the example of a multichannel radio network under conditions of counter-acting destructive factors by managing the distribution of the network's protective resource. The method is based on the method of two functions and successive increments and allows one to achieve potential capabilities for ensuring network stability in the worst conditions.*

***Keywords:** multichannel radio communication network, stability, morphological parameters of the network, destructive factors, network structure.*