

## Выводы

Передискретизация сигналов к единой частоте дискретизации перед проведением взаимного корреляционного анализа вносит погрешность передискретизации. Применение корреляционной функции  $\tilde{r}_{\tilde{X}\tilde{Y}}$  позволяет пропустить этот этап.

Функция  $r_{XY}$  является корреляционным коэффициентом Пирсона, рассчитанным в частотной области и абсолютно ему тождественна для действительных сигналов. Обобщенная версия этой функции  $\tilde{r}_{\tilde{X}\tilde{Y}}$  применима для корреляционного

анализа сигналов с разной частотой дискретизации, в том числе многомерных.

Тот факт, что расчет  $\tilde{r}_{\tilde{X}\tilde{Y}}$  ведется в частотной области, позволяет производить преобразования анализируемых сигналов в процессе расчета  $\tilde{r}_{\tilde{X}\tilde{Y}}$  (линейная коррекция, фильтрация, применение окон РНАТ или МЛ и т.д.).

## Литература

1. Сергиенко А.Б. Цифровая обработка сигналов. СПб.: Питер, 2002. – 253 с.

## NORMALIZED CORRELATION FUNCTION FOR SIGNAL ANALYSIS WITH DIFFERENT SAMPLE RATES

Kuzmin S.V.

**Generalization of Pearson's correlation coefficient for the direct analysis of signals with different sample rates without resampling.**

*Keywords:* cross-correlation, scale-invariant signal.

Кузьмин Сергей Викторович, аспирант Кафедры «Системы связи» Поволжского государственного университета телекоммуникаций и информатики. Тел. 8-790-229-527-46. E-mail: skzmn@ya.ru

## ТЕХНОЛОГИИ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ

УДК 004.7:621.39

### МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ СВОЙСТВ МАГИСТРАЛЕЙ ТРАНСПОРТНЫХ СЕТЕЙ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ НЕСКОЛЬКИХ КЛАССОВ ОБСЛУЖИВАНИЯ

Гавлиевский С.Л.

Составлена система нелинейных алгебраических уравнений, описывающая потоки на ветвях и узлах сети в стационарном режиме при адресной рассылке пакетов на мультисервисной сети связи (МСС) с несколькими классами обслуживания. Решение системы позволяет рассчитать для каждой категории обслуживания время задержки и вероятности потерь пакетов между каждой парой узлов сети, а также потоки на ветвях и узлах сети, задержки, вероятности блокировок и уровни загрузки каналов. Приведен пример расчета характеристик магистрали МСС.

**Ключевые слова:** вероятностно-временные характеристики, классы обслуживания, конечные дискретные цепи Маркова, маршрутизация, маршрутная таблица, математическая модель, мультисервисная сеть, матрица переходных вероятностей, система нелинейных алгебраических уравнений

### Математическая модель для расчета показателей качества обслуживания МСС при использовании нескольких классов обслуживания

Современные МСС обычно используют несколько классов обслуживания, при этом для каждого класса может использоваться как свой план распределения информации (ПРИ), так и свои отдельные очереди в телекоммуникационных устройствах [1-2]. В общем случае маршрутные таблицы (МТ) для пакетов различных классов могут быть различными, поэтому сама МТ будет не двумерной, а трехмерной, а в качестве третьего индекса элементов МТ  $m^{(l)}(ij, s)$  будет выступать номер очереди.

Обозначим через  $M_i$  МТ  $i$ -узла, учитывающую особенности передачи трафика для каждого  $s \in [1, S]$  класса обслуживания и имеющую раз-

мер  $r_i \times (n_u - 1) \times S$ . Тогда ПРИ для сети в целом может быть записан в виде:

$$\mathbf{M} = \{\mathbf{M}_1, \dots, \mathbf{M}_i, \dots, \mathbf{M}_{n_u}\}.$$

Рассмотрим приведенный на рис. 1 фрагмент узла. При передаче пакетов по сети с несколькими классами обслуживания необходимо определить не только исходящее из узла направление, по которому следует направить пакет дальше по сети, но и выходную очередь направления, соответствующую приоритету или классу обслуживания пакета. Пусть каждая выходная очередь обслуживается логическим каналом с пропускной способностью  $c_{ijs}$ , тогда трехмерный массив  $\mathbf{C} = [c_{ijs}]_{n_u \times n_u \times S}$  будет содержать пропускные способности ветвей сети, выделяемые для передачи каждого класса трафика.

Введем следующие обозначения:

- обозначим через  $\Lambda = [\Lambda_{kls}]_{n_u \times n_u \times S}$  матрицу интенсивностей поступления потоков. Тогда элемент  $\Lambda_{kls}$  будет равен потоку  $s$  класса, который необходимо передать по сети между рассматриваемой парой узлов  $k$  и  $l$ ;

- через  $\mu = [1, \dots, \mu_s, \dots, \mu_S]$  – вектор размерности  $S$ ,  $\mu_s$  – элемент которого равен обратной величине среднего размера длины пакета в битах для трафика класса  $s$ ;

- через  $\tau_{ijs}$  задержку при передаче пакета по ветви  $(ij)$ ,  $s$  – очередь, через  $\pi_{ijs}$  – вероятность ее блокировки, через  $o_{ijs}$  и  $\omega_{ijs}$  – очередь и число мест ожидания, через  $\lambda_{ijs}$  – поток, поступающий на ветвь  $(ij)$  в  $s$  очередь системы буфер-канал, через  $\rho_{ijs}$  – уровень ее загрузки. Эти величины будем хранить в трехмерных массивах:

$$\boldsymbol{\tau} = [\tau_{ijs}]_{n_u \times n_u \times S}, \quad \boldsymbol{\pi} = [\pi_{ijs}]_{n_u \times n_u \times S},$$

$$\mathbf{o} = [o_{ijs}]_{n_u \times n_u \times S}, \quad \mathbf{w} = [w_{ijs}]_{n_u \times n_u \times S},$$

$$\boldsymbol{\lambda} = [\lambda_{ijs}]_{n_u \times n_u \times S}, \quad \boldsymbol{\rho} = [\rho_{ijs}]_{n_u \times n_u \times S}.$$

Обозначим через  $\boldsymbol{\sigma} = [\sigma_{kls}]_{n_u \times n_u \times S}$ ,

$$\mathbf{T} = [t_{kls}]_{n_u \times n_u \times S}, \quad \mathbf{X} = [x_{kls}]_{n_u \times n_u \times S}, \quad \mathbf{Z} = [z_{kls}]_{n_u \times n_u \times S}$$

матрицы размером  $n_u \times n_u \times S$ , содержащие информацию о характеристиках качества обслуживания между каждой парой узлов для каждого класса обслуживания.

Матрица  $\boldsymbol{\sigma}$  будет содержать вероятности потерь пакетов, матрица  $\mathbf{T}$  – возникающие при этом задержки, матрица  $\mathbf{X}$  – число переприемов (хопов), матрица  $\mathbf{Z}$  – вероятности закливания пакетов.

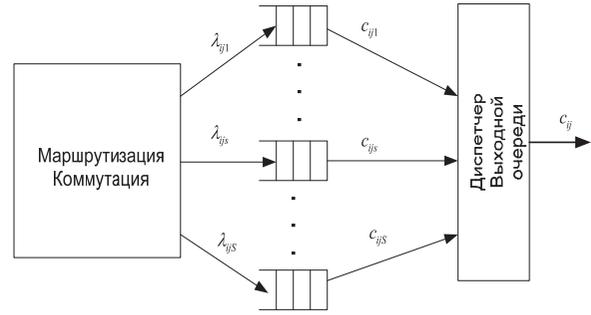


Рис. 1. Демультимплексирование выходного потока в соответствии с классом обслуживания

Поскольку на сетях с использованием нескольких классов обслуживания элементы МТ  $i$ -узла зависят от класса обслуживаемого, то для каждого класса обслуживания необходимо рассчитывать свою матрицу переходных вероятностей (МПВ), которая, как и в случае с одним классом обслуживания, будет квадратной.

Не изменится также вид матриц и векторов, являющихся результатом ее обработки.

Обозначим через  $P_s^{(l)}$  МПВ, соответствующую  $s$  – классу обслуживания, а через  $N_s^{(l)}$  – фундаментальную матрицу, тогда будет справедливо следующее:

$$\mathbf{P}^{(l)} = \{P_1^{(l)}, \dots, P_s^{(l)}, \dots, P_S^{(l)}\};$$

$$\mathbf{N}^{(l)} = \{N_1^{(l)}, \dots, N_s^{(l)}, \dots, N_S^{(l)}\}.$$

Для удобства будем хранить результаты вычислений соответствующих матриц и векторов в трехмерных массивах:

$$\mathbf{P}^{(l)} = [p_{ijs}^{(l)}]_{(n_u+1) \times (n_u+1) \times S},$$

$$\mathbf{N}^{(l)} = [n_{ijs}^{(l)}]_{(n_u+1) \times (n_u+1) \times S}.$$

С учетом ранее введенных обозначений для случая с классами обслуживания для элементов МПВ может быть записано:

$$\mathbf{P}^{(l)} = f_p(\mathbf{M}, \boldsymbol{\pi}); \quad \mathbf{N}^{(l)} = f_N(\mathbf{P}^{(l)}), \forall l \in [\overline{1, n_u}], \forall s \in [\overline{1, S}]$$

$$\lambda_{ijs} = \frac{\sum_{l=1}^{n_u} \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq l}}^{n_u} p_{ijs}^{(l)} \Lambda_{kls} \cdot n_{kls}^{(l)}}{1 - \pi_{ijs}}.$$

Запишем последнее выражение с учетом введенных в этом пункте обозначений:

$$\boldsymbol{\lambda} = f_\lambda(\boldsymbol{\Lambda}, \mathbf{N}, \boldsymbol{\pi}).$$

Таким образом, для случая с  $S$  классами обслуживания с учетом введенных в этом пункте

обозначений аналогичная система будет выглядеть следующим образом:

$$\lambda = \lambda_0,$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \mathbf{P}^{(l)} = f_p(\mathbf{M}, \boldsymbol{\pi}), \quad \forall l \in [\overline{1, n_u}], \forall s \in [\overline{1, S}], \\ \mathbf{N}^{(l)} = f_N(\mathbf{P}^{(l)}), \quad \forall l \in [\overline{1, n_u}], \forall s \in [\overline{1, S}], \\ \lambda = f_\lambda(\mathbf{P}^{(l)}, \mathbf{N}^{(l)}, \Lambda, \boldsymbol{\pi}), \quad \forall l \in [\overline{1, n_u}], \forall s \in [\overline{1, S}], \\ \boldsymbol{\pi} = f_\pi(\lambda), \\ \mathbf{C} = \sum_{s=1}^S \mathbf{C}_s. \end{array} \right.$$

Если записать эту систему в виде отдельных уравнений, то она будет содержать переменные типа  $\lambda_{ijs}, \pi_{ijs}, n_{kis}^{(l)}, p_{ijs}^{(l)}$ . Количество уравнений каждого типа и переменные, входящие в эти уравнения, приведены в таблице 1.

Из этой таблицы видно, что число приведенных уравнений системы совпадает с числом неизвестных и равно  $S \cdot 2 \cdot n_u \cdot (n_u - 1)^2 + S \cdot 2 \cdot r$ . Это означает, что выполняется одно из необходимых условий существования единственного решения системы.

Таблица 1. Число различных типов переменных в системе

Тип уравнения	Число уравнений	Число переменных типа			
		$\lambda_{ijs}$	$\pi_{ijs}$	$n_{kis}^{(l)}$	$p_{ijs}^{(l)}$
$\mathbf{P}^{(l)} = f_p(\mathbf{M}, \boldsymbol{\pi})$	$S \cdot n_u \cdot (n_u - 1)^2$	–	$S \cdot r$	–	$S \cdot n_u \cdot (n_u - 1)^2$
$\mathbf{N}^{(l)} = f_N(\mathbf{P}^{(l)})$	$S \cdot n_u \cdot (n_u - 1)^2$	–	–	$S \cdot n_u \cdot (n_u - 1)^2$	$S \cdot n_u \cdot (n_u - 1)^2$
$\lambda = f_\lambda(\mathbf{P}^{(l)}, \mathbf{N}^{(l)}, \Lambda, \boldsymbol{\pi})$	$S \cdot r$	$S \cdot r$	$S \cdot r$	$S \cdot n_u \cdot (n_u - 1)^2$	$S \cdot n_u \cdot (n_u - 1)^2$
$\boldsymbol{\pi} = f_\pi(\lambda)$	$S \cdot r$	$S \cdot r$	$S \cdot r$	–	–

### Исследование влияния изменения нагрузки и пропускных способностей каналов

Современные мультисервисные сети характеризуются значительными колебаниями нагрузки в течение достаточно коротких промежутков времени. Используя описанную выше модель, проанализируем влияние изменения величины поступающей нагрузки при неизменном характере тяготения для случаев, когда пропускная способность каналов, соединяющих соседние узлы, составляет соответственно  $C = 1$  Гбит/С и  $C = 2$  Мбит/С. Топология сети приведена на рис. 2, а результаты расчетов показаны на рис. 3 [3]. При расчетах приняты следующие исходные данные:

- топология – кольцевая;
- число узлов – 8;
- характер тяготения – централизованный;
- число центров тяготения – 1, номер ЦМУ – 1;
- число классов обслуживания – 4;
- тип СМО, описывающей СБК – M/D/1/N;
- варианты расчета:
- вариант 1а: пропускная способность каналов на каждом участке  $C = 1$  Гбит/С;
- вариант 1б: пропускная способность каналов на каждом участке  $C = 2$  Мбит/С;

- варианты 2а и 2б: отличаются от вариантов 1а и 1б тем, что пропускная способность ветвей (1-2) и (1-8) удвоена;

- нагрузка на сеть – меняющаяся.  $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4$  – интенсивности поступления пакетов соответственно 1, 2, 3 и 4 классов прием равными  $\lambda$ , которая изменяется в диапазоне  $\lambda = 0 - 7,5 \cdot 10^3$  пак/С при  $C = 1$  Гбит/С и  $\lambda = 0 - 1,5 \cdot 10^1$  пак/с при  $C = 2$  Мбит/С. (Заметим, что диапазон изменения нагрузки выбран таким образом, чтобы уровни загрузки ветвей для  $C = 1$  Гбит/С и  $C = 2$  Мбит/С совпадали);

- размеры пакетов 1-4 классов:

$$lpak1 = 500[бум], \quad lpak2 = 1000[бум],$$

$$lpak3 = 5000[бум], \quad lpak4 = 15000[бум];$$

- доля пропускной способности каналов сети, отводимая для передачи пакетов 1-4 классов:  $C_4 = 0,5C; C_3 = 0,3C; C_2 = 0,1C; C_1 = 0,1C;$

- размер буферной памяти для каждого класса обслуживания  $\omega = 10[пак]$ .

Результаты расчета:

-  $t_{sr4}, t_{sr3}, t_{sr2}, t_{sr1} = f(\lambda)$  – зависимости среднесетевых задержек от интенсивности поступления пакетов для каждого из 4 классов до и после удвоения пропускных способностей ветвей (1-8) и (1-2);

-  $\rho_{sr_1}, \rho_{sr_2}, \rho_{sr_3}, \rho_{sr_4} = f(\lambda)$  – зависимости среднесетевых потерь от интенсивности поступления пакетов для каждого из 4 классов обслуживания до и после удвоения пропускных способностей ветвей (1-8) и (1-2);

-  $\rho_{sr_1}, \rho_{sr_2}, \rho_{sr_3}, \rho_{sr_4} = f(\lambda)$  – зависимости среднесетевых уровней загрузки каналов от интенсивности поступления пакетов для каждого из 4 классов обслуживания до и после удвоения пропускных способностей ветвей (1-8) и (1-2).

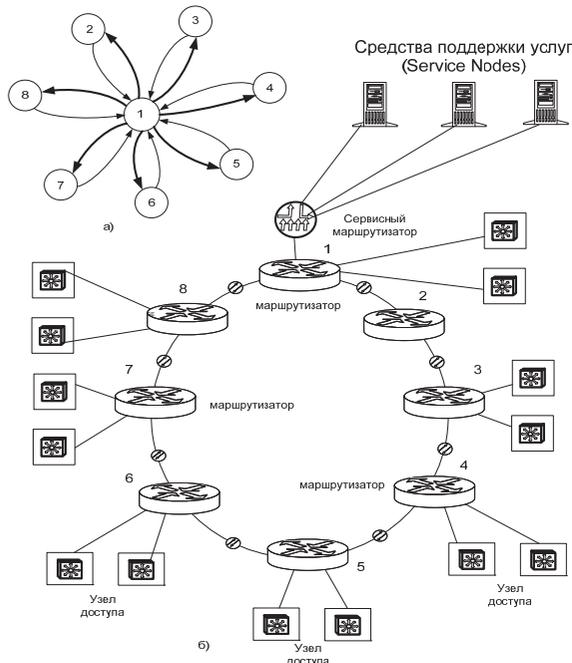


Рис.2. Пример построения магистрали транспортной сети с кольцевой топологией: а) – структура тяготения; б) – топология сети.

Соответствующие графики приведены на рис. 3. Цифрами в кружочках на графиках отмечены номера вариантов расчета. Цифра «1» соответствует случаю, когда пропускные способности всех каналов сети равны между собой. Цифрой «2» помечены графики, когда пропускные способности наиболее перегруженных ветвей (1-8) и (1-2) удвоены. Заметим, что некоторые оси на графиках имеют по две шкалы. Значения на первой проставлены обычным шрифтом и соответствуют  $C = 1$  Гбит/С. Значения на второй выделены жирным шрифтом и соответствуют  $C = 2$  Мбит/С. Нетрудно видеть, что среднесетевые характеристики существенно зависят от класса обслуживания. При этом наименьшие задержки и потери соответствуют первому классу обслуживания, а наибольшие – четвертому классу.

Литература

1. Гавлиевский С.Л. Методы анализа мультисервисных сетей связи с несколькими классами обслуживания. М.: ИРИАС, 2010. – 353 с.
2. Гавлиевский С.Л. Математическая модель для расчета показателей качества обслуживания при использовании нескольких классов обслуживания // Труды IX РНПК «Компьютерные технологии в науке, практике и образовании». Самара, 2010. – С. 13-16.
3. Гавлиевский С.Л. Расчет характеристик и использование свойств магистралей транспортных сетей при использовании нескольких классов обслуживания // Труды IX РНПК «Компьютерные технологии в науке, практике и образовании». Самара, 2010. – С. 17-19.

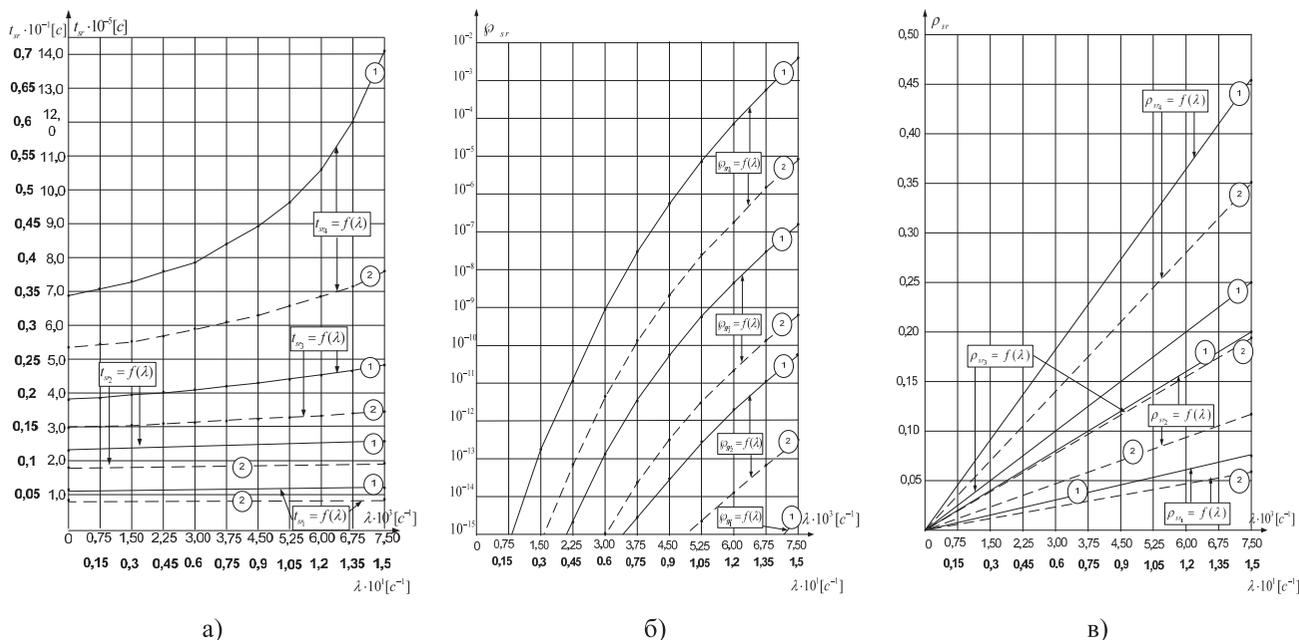


Рис.3. Зависимости среднесетевых задержек, потерь, уровней загрузки каналов от интенсивности поступления пакетов для каждого из 4 классов до и после удвоения пропускных способностей ветвей (1-8) и (1-2) при двух значениях пропускной способности магистрали: 1 Гбит/С и 2 Мбит/С

## MATHEMATICAL MODEL FOR RESEARCH OF PROPERTIES OF HIGHWAYS OF TRANSPORT NETWORKS AT USE OF SEVERAL CLASSES OF SERVICE

Gavlievskiy S.L.

In this article was made the system of the nonlinear algebraic equations describing streams on branches and units of a network in a stationary mode at address dispatch of packages on a multiservice communication network with several classes of service. The decision of system allows to calculate for each grade of service time of a delay and probability of losses of packages between each pair units of a network, and also streams for branches and units of a network, a delay, probability of blocking and levels of loadings of channels. The example of calculation of characteristics of a highway of a multiservice network is given.

**Keywords:** probability-time characteristics, classes of service, final discrete Markov circuits, routing, the routing table, mathematical model, a multiservice network, a matrix of transitive probabilities, system of the nonlinear algebraic equations. .

Гавлиевский Серго Леонидович, к.т.н., начальник отдела сетевой интеграции ОАО «Гипросвязь». Тел. (8-846) 270-89-45. E-mail: gsl@gs7.ru

УДК 65.021.56

## ПРИМЕНЕНИЕ ВЕНГЕРСКОГО МЕТОДА ПРИ РЕШЕНИИ ЗАДАЧ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ РЕСУРСОВ ДЛЯ ЛОКАЛЬНЫХ СЕТЕЙ НА ПОДВИЖНЫХ ПЛАТФОРМАХ

Аверьянов Е.С., Касеева Н.А., Назаров С.Н.

Рассмотрены принципы функционирования локальной сети абонентов, размещенной на мобильной платформе, осуществляющей перемещение с высокой скоростью, на примере железнодорожного состава (mobile hotspot – MHS). Предложены алгоритмы повышения эффективности функционирования MHS на основе решения оптимизационной задачи определения максимальной пропускной способности системы. Решены две подзадачи: определения множества соответствия ретрансляторов базовой сети и антенн на подвижной платформе и распределения мощности передачи сигнала по линиям из множества соответствия. Решение первой подзадачи найдено при помощи венгерского метода, второй – симплекс-метода.

**Ключевые слова:** локальная сеть на мобильной платформе, ретранслятор, зональный диспетчер, двудольный граф, множество соответствия, вектор мощности, пропускная способность системы, венгерский метод, симплекс-метод.

### Введение

Технология MHS, определяемая как локальная сеть на подвижной платформе, становится широко востребованной. Внедрение MHS позволит пассажирам высококомобильных систем, таких как скоростные поезда, морские и воздушные суда, используя свои инфокоммуникационные устройства – мобильные телефоны, ноутбуки и др., осуществлять доступ к ресурсам глобальных или

корпоративных сетей. В этом случае решается проблема энергоснабжения при использовании мощных антенных систем. Наиболее перспективной является реализация MHS для железнодорожных транспортных систем [1], структурная схема которой показана на рис.1.

Согласно рис.1 общая коммуникационная сеть транспортной системы – совокупность коммутационного оборудования, которое обеспечивает передачу информационных потоков между глобальной сетью и местными информационными центрами – зональными диспетчерами (zone controllers – ZC). Сеть ZC отвечает за прием и передачу трафика, регистрацию в сети подвижной платформы и ее мобильных абонентов в зоне своей ответственности, которая представляет собой участок в несколько километров железнодорожного пути. ZC направляет информационный поток из глобальной сети одновременно на все связанные с ним ретрансляторы (repeater –  $R_n$ ), которые передают нагрузку на множество антенн ( $A_{n1}, \dots, A_{nN}$ ), установленных на подвижной платформе. Все  $A_n$  подключены к станции подвижной платформы (vehicle station – VS), которая передает нагрузку точкам доступа (access points – AP) локальной беспроводной сети абонентов. Предлагаемая система позволяет предоставлять информационные услуги абонентам без перерывов связи [1].