

## **ОПТИМИЗАЦИЯ ФРАГМЕНТА ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННОЙ СЕТИ**

**К.С. СУНДУЧКОВ**

Разработаны метод анализа и определения параметров телекоммуникационных сетей, их математические модели, определены области изменения параметров и области задания значений независимых переменных, разработан метод оптимизации, критерий оптимизации. Приведен пример поиска оптимальных значений параметров телекоммуникационной сети.

### **ВВЕДЕНИЕ**

Реализация всех требований к сети по максимуму может привести к необоснованно дорогой сети либо вообще к нереальной сети. Необходимо найти компромиссные варианты, либо оптимальные соотношения требований к параметрам.

Поиск оптимальных значений параметров сети предполагает предварительный анализ и выбор параметров сети, разработку их математических моделей, задание области изменения величин выбранных параметров и области задания значений независимых переменных, определение метода оптимизации, задания критерия оптимизации.

Выбор параметров сети зависит как от самой сети, так и от целей решаемой задачи.

### **ОБЪЕКТ ОПТИМИЗАЦИИ**

В качестве конкретного объекта оптимизации выбран участок беспроводного доступа в интерактивной гетерогенной телекоммуникационной сети (ИГТС).

Возможный вариант состава ИГТС с асимметричным трафиком для мобильных абонентов движущихся со скоростью до 200 км/час, с участком беспроводной сети доступа в миллиметровом диапазоне, расположенным вдоль автомобильной либо железнодорожной трассы приведен в работе [1].

Беспроводная сеть доступа в рассматриваемом объекте организуется в миллиметровом диапазоне частот. Сигнал поступает на базовые станции (БС) через направленные ответвители (НО) по оптоволоконной линии, соединяющей ретрансляторы (РТР) с базовыми станциями.

Мобильный терминал (МТ) абонента содержит два комплекта оборудования. Один для приема мультимедийных услуг по высокоскоростному каналу в миллиметровом диапазоне частот с одной антенной (либо с несколькими антеннами в случае применения ММО технологии). Второй комплект оборудования для организации запросного канала и выполнения ряда интерактивных функций.

Перечисленные концептуальные положения построения ИГТС предполагают вариации ряда параметров для оптимизации сети по выбранному критерию. Такими варьируемыми параметрами могут быть: диапазон частот на участке беспроводного доступа; тип магистрального канала (оптоволоконный либо спутниковый канал); количество «крыльев», а следовательно и количество базовых станций в сегменте сети; ширина полосы рабочих частот приемника мобильного абонента и его эквивалентная шумовая температура входа и т.п. Различные сочетания перечисленных параметров порождают дискретное множество систем, отвечающих требованиям технического задания. Оптимизация на дискретном множестве указанных систем позволяет при проектировании определить лучшую из систем по заданному критерию.

### **ХАРАКТЕРИСТИКА ПАРАМЕТРОВ СЕТИ И МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ИХ ВЫЧИСЛЕНИЯ**

В качестве основных параметров участка беспроводного доступа в сети выбраны параметры, характеризующие количество и качество предоставляемых услуг абонентам и цену оборудования фрагмента сети, которая зависит от количества и качества предоставляемых услуг.

При проектировании описанного выше объекта ИГТС, расположенного вдоль трассы автобана, будем исходить из следующих данных: при скорости 200 км/час (55 м/с) за 9 секунд мобильный терминал преодолевает 500 м. Отсюда можно предположить, что для безопасности движения плотность размещения абонентов может быть равна 4 абонента на 1 км трассы (по 2 МТ в обе стороны).

Сегментом трассы назовем участок трассы, обслуживаемый конечным числом базовых станций, запрашиваемых от одного РТР.

Считаем, что для каждого автомобиля есть возможность получать одну или несколько комбинированных услуг одновременно. Под ресурсом комбинированной услуги подразумеваем ресурс для одной услуги, требующей высокую пропускную способность сети, плюс ресурс требуемый для передачи одной услуги с низкой скоростью передачи (например: телепрограмма + передача данных).

Не приводя подробного анализа трафика перечисленных выше услуг, можно условно считать, что с учетом эффекта Доплера, помехоустойчивого кодирования, сжатия спектра с помощью MPEG-4 и т.п., требуемая пропускная способность сети для одной комбинированной услуги составит не более 3 Мбит/сек. Для одного звена трассы длиной 50 км (двести абонентов) требуемый минимальный ресурс звена составляет 0,6 Гб/сек.

В качестве потребительских параметров сети заявленных в требованиях технического задания представим (количество, качество, цена): 1 — количество комбинированных услуг предоставляемых одновременно каждому абоненту; 2 — качество предоставляемых услуг, измеряемое как вероятность битовой ошибки приемника-декодера ( $P_{в.б.о.}$ ) при заданном соотношении мощности сигнала к мощности шума на его входе; 3 — стоимость оборудования всех БС и РТР на участке трассы длиной 50 км.

Кроме «потребительских» параметров сети имеется целый ряд параметров отдельных объектов влияющих на качество предоставляемых услуг абонентам на участке беспроводного доступа, формирующих цену оборудования сети и т.п. К ним относятся  $f_c$  — частота сигнала, вид модуляции, эквивалентная изотропно-излучаемая мощность сигнала на выходе антенны БС;  $\Delta f_{\text{ш}}^{\text{MT}}$  — рабочая полоса приемника мобильного терминала;  $P_{\text{в.б.о.}}$  — вероятность битовой ошибки приемника-декодера МТ;  $A$  — отношение мощности сигнала к мощности шумов на входе приемника-декодера, при которой он обеспечивает заданную  $P_{\text{в.б.о.}}$ ;  $T_{\text{ш.вх}}^{\text{MT}}$  — эквивалентная шумовая температура на входе приемника МТ в плоскости стыковки антенны МТ со входным линейным трактом приемника МТ;  $G_2^A$  — коэффициент усиления антенны МТ;  $G_1^A$  — коэффициент усиления антенны БС.

Представим параметр, характеризующий количество предоставляемых услуг абоненту в виде удобном для постановки оптимизационной задачи и определим область его изменения. Положим, что абонент может получать от одной до двух комбинированных услуг. В этом случае для одной комбинированной услуги для каждого абонента потребуется ресурс пропускной способности сети, как было показано выше, равный 3 Мбит/сек, для двух — 6 МГбит/сек. Желание предоставить абоненту большее число услуг ведет к увеличению требования к пропускной способности сети, в то время как сеть считается лучшей если цена и вероятность битовой ошибки при приема сигнала уменьшается, а не увеличивается. При построении целевой функции для оптимизационной задачи необходимо все три параметра привести к форме, позволяющей при поиске оптимальных значений этих параметров минимизировать, либо максимизировать целевую функцию.

Введем параметр сети  $y_1$  в виде обратной величины требуемого ресурса пропускной способности сети. Тогда размерность параметра  $y_1$  будет равна [сек/бит], что означает: сколько потребуется времени для передачи заданного объема информации. При таком представлении параметра  $y_1$  сеть будет лучше, если потребуется меньше времени для передачи заданного объема информации, т.е. в целевой функции можно минимизировать параметр  $y_1$ .

Рассчитаем область изменения параметра  $y_1$  на участке трассы длиной 50 км (200 абонентов) при предоставлении каждому абоненту одной услуги  $y_{1(1)}$  и двух услуг  $y_{1(2)}$ :

$$y_{1(1)} = 1/(3 \cdot 10^6 \cdot 200) = 0,167 \cdot 10^{-8} [\text{сек} / \text{бит}] = 1,667 [\text{сек} / \text{Гбит}]$$

$$y_{1(2)} = 1/(6 \cdot 10^6 \cdot 200) = 0,0833 \cdot 10^{-8} [\text{сек} / \text{бит}] = 0,833 [\text{сек} / \text{Гбит}].$$

Параметр, характеризующий качество ( $P_{\text{в.б.о.}}$ ), зададим в виде трех значений:

$$y_{2(1)} = 10^{-7}; \quad y_{2(2)} = 10^{-6}; \quad y_{2(3)} = 10^{-5}.$$

Этими значениями и определится область изменения параметра  $y_2$ . В скобках указан порядковый номер значения параметра  $P_{\text{в.б.о.}}$ .

Параметр, характеризующий цену оборудования БС и РТР на участке одного звена с длиной трассы 50 км, вычислялся отдельно для каждого варианта построения сети, имея в виду, что он зависит от параметров:  $f_c$ ,  $G_1^A$ ,  $\Delta f_{\text{ш}}^{\text{МТ}}$ ,  $P_{\text{в.б.о.}}$ ,  $A$ ,  $T_{\text{ш.вх.}}^{\text{МТ}}$ ,  $G_2^A$  и ориентации антенны БС относительно трассы. Расчетные значения суммарной цены оборудования БС и РТР расположенных вдоль трассы длиной 50 км  $y_3$  для различных вариантов построения сети изменялись от 1,932 млн \$ США до 7,2 млн \$ США. Эти данные и означают границы изменения параметра.

Для фрагмента телекоммуникационной сети (звено в ИГТС с длиной трассы  $Z = 50$  км) математические выражения искомым либо задаваемых параметров имеют следующий вид:  $y_{1(m)} = \frac{1}{V_{1(m)} N}$  [сек/бит] — обратная

величина требуемого ресурса для выбранного количества предоставляемых услуг.

Здесь  $V_{1(m)}$  — требуемая пропускная способность сети для предоставления каждому абоненту (мобильному терминалу)  $m$  комбинированных услуг;  $N$  — число МТ на участке трассы длиной 50 км.

$y_{2(n)} = P_{\text{в.б.о.}}(n)$  — параметр, характеризующий качество предоставляемых услуг, где  $n$  — порядковый номер заданного значения вероятности битовой ошибки приемника-декодера МТ в зависимости от выбранного его типа;  $y_{3(q)} = \frac{Z \cdot C^{\text{РТР}}}{L_{\text{сегм.тр.}}} + \frac{Z \cdot v^{\text{БС}} \cdot C^{\text{БС}}}{L_{\text{сегм.тр.}}}$  — параметр, характеризующий цену

оборудования на участке одного звена, где  $L_{\text{сегм.тр.}}$  — длина одного сегмента трассы;  $C^{\text{РТР}}$  — стоимость оборудования одного РТР с установкой и запуском;  $C^{\text{БС}}$  — стоимость оборудования одной БС с установкой и запуском;  $v^{\text{БС}}$  — количество БС в одном сегменте трассы, которое определяется распределительной системой сигналов (набором направленных ответвителей мощности) обеспечивающей одинаковую мощность сигналов поступающих на каждую БС.  $L_{\text{сегм.тр.}} = v^{\text{БС}} \cdot L_{\text{тр}}^{\text{БС}}$ , где  $L_{\text{тр}}^{\text{БС}}$  — отрезок трассы, обслуживаемый одной БС.  $L_{\text{тр}}^{\text{БС}} = d \cdot 0,585$ , где  $d$  — расстояние между антеннами БС и МТ при перпендикулярной ориентации диаграммы направленности (ДН) антенны БС к оси участка трассы; 0,585 — коэффициент, учитывающий соотношение ширины диаграммы направленности по уровню половинной мощности к ее длине. Величину  $d$  находим из соотношения:

$$\frac{\text{ЭИИМ}_1^A}{\text{ЭИИМ}_2^A} = \frac{16 \cdot \pi^2 \cdot d^2}{\lambda^2}, \text{ где } \pi = 3,14; \lambda = c/f_c, c \text{ — скорость света;}$$

$\text{ЭИИМ}_1^A$  — эквивалентная изотропно-излучаемая мощность в апертуре антенны БС;  $\text{ЭИИМ}_2^A$  — требуемая эквивалентная изотропно-излучаемая

мощность в апертуре антенны МТ необходимая для обеспечения соответствующего отношения мощности сигнала к мощности шумов на входе приемника-декодера равного  $A$ . ЭИИМ $_1^A = P_{\text{нас.фд.}} \cdot (m \cdot 0,05) \cdot 1/100 \cdot G_1^A$ , где  $P_{\text{нас.фд.}}$  — уровень мощности насыщения фотодиода БС;  $(0,05)$  — коэффициент, учитывающий выходную мощность сигнала одной комбинированной услуги излучаемой антенной БС. Здесь считается, что одна БС излучает сигналы несущие в себе до двадцати комбинированных услуг, т.е. в поле одной БС могут получить по одной ( $m = 1$ ), либо по две ( $m = 2$ ) комбинированной услуги от 20 до 10 МТ соответственно. Такое скопление МТ может иметь место, например, на заправке бензином, либо во дворе гостиницы. Коэффициент 0,01 отражает коэффициент передачи (потери) при преобразовании сигналов в БС.

ЭИИМ $_2^A = k \cdot T_{\text{ш.вх.}}^{\text{МТ}} \cdot \Delta f_{\text{ш}}^{\text{МТ}} \cdot A \cdot 1/G_2^A \cdot 2$  — эквивалентная изотропно излучаемая мощность, необходимая на входе приемной антенны МТ, где  $k$  — постоянная Больцмана, а 2 — коэффициент учитывающий «половинную» мощность сигнала в диаграмме направленности антенны БС на участке пересечения ее трассой. Остальные обозначения определены выше.

## АЛГОРИТМЫ ОПТИМИЗАЦИИ

Корректное моделирование системы в целом возможно при едином математическом описании всех подсистем и учете взаимодействия подсистем между собой и внешней средой. Этим требованиям удовлетворяет модель агрегативной системы, представляющая собой функционально необходимую совокупность конечного числа агрегатов и связей между ними [2, 3].

Описанный выше объект оптимизации может быть представлен моделью агрегативной системы состоящей из четырех агрегатов (рис. 1): агрегат звена трассы, агрегат сегмента трассы, агрегат соты с БС и фиктивный агрегат представления данных [4]. Кроме того, во взаимодействии с объектом оптимизации участвует окружающая среда, которая тоже представляется отдельным агрегатом.

Воздействия окружающей среды на объект оптимизации состоят из:

- требований предъявляемых техническим заданием к искомым параметрам ( $y_1^{\text{TЗ}}$ ,  $y_2^{\text{TЗ}}$ ,  $y_3^{\text{TЗ}}$ );
- цен на используемое оборудование ( $C^{\text{РТР}}$ ,  $C^{\text{БС}}$ );
- параметров участков ИГТС, не вошедших в объект оптимизации;
- параметров МТ и др.

Если учесть конечное число значений учитываемых при оптимизации параметров, то моделью для поиска возможных вариантов сети может служить конечный автомат — наиболее простая модель разновидности дискретных динамических систем. Для описания работы этой модели введем понятие дискретного времени. Если взять в момент времени  $t_1$  один набор значений входных параметров и все их ввести в модель конечного автомата,

то на выходе будем иметь набор значений выходных параметров одного варианта реализации сети. В следующий такт дискретного времени возьмем второй набор значений входных параметров и получим на выходе автомата набор значений выходных параметров второй реализации сети т.д.

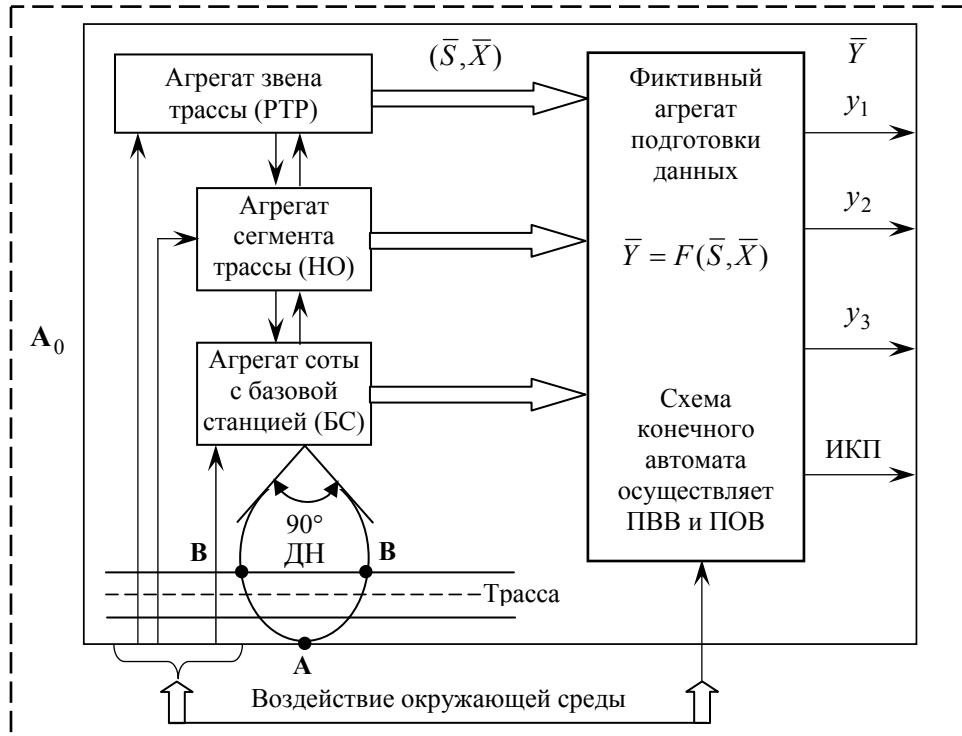


Рис. 1. Агрегативная модель объекта, где  $A_0$  — агрегат «окружающая среда»

Согласно принятой терминологии в [5], множество  $\bar{X}$  — алфавит входов, множество  $\bar{Y}$  — алфавит выходов, а  $\bar{S}$  — множество начальных состояний, характеризующиеся постоянными значениями параметров систем (в нашем случае сети), имеющей фиксированную структуру.  $F$  — функционал отображающий зависимость:  $\bar{Y} = F(\bar{S}, \bar{X})$ .

Оператор задается системой правил и математических зависимостей позволяющих за конечное число тактов для любого входного слова из области определения найти соответствующее выходное слово. Для определения параметров каждой реализации системы (сети) применяется оператор, осуществляющий побуквенное отображение входных слов в выходные. Алгоритм такого отображения функционирует в соответствии с математическими выражениями.

Аналитическое выражение целевой функции при оптимизации представим в виде:

$$\varphi(\bar{X}, \bar{S}) = \prod_{i=1} R_i \cdot B_i \rightarrow \text{opt},$$

$R_i$  — булева переменная, отражающая факт удовлетворения  $i$ -ым параметром требования технического задания (ТЗ):

$$R_i = \begin{cases} 0, & \text{если } y_i \text{ не удовлетворяет требованию ТЗ;} \\ 1, & \text{если } y_i \text{ удовлетворяет требованию ТЗ.} \end{cases}$$

$B_i = \frac{y_i}{y_i^{\text{ТЗ}}}$ , где  $B_i$  — вычисленное, либо заданное значение  $i$ -го параметра

нормированное на величину  $i$ -го параметра, заданного в требованиях ТЗ.

Алгоритм синтеза оптимальной системы по заданным требованиям в ТЗ разработан с целью снижения затрат при разработке систем, исключения разработок новых модификаций функциональных элементов с параметрами близкими к уже имеющимся. Этот алгоритм состоит из двух частей. В первой части алгоритма осуществляется поиск возможных вариантов (ПВВ) искомой системы. После определения дискретного множества возможных вариантов системы включается в работу вторая часть алгоритма, осуществляющая поиск оптимального варианта (ПОВ) системы.

Интегральным критерием предпочтения (ИКП) назовем значение целевой функции для возможного варианта системы, удовлетворяющего требованиям ТЗ.

При поиске оптимального варианта ранжируются системы по значению ИКП и выбирается система с минимальным значением ИКП. Оптимальный вариант системы соответствует такому набору ее параметров, при котором ИКП имеет минимальное значение [6]

$$\text{ИКП} = \min \prod_{i=1} R_i B_i .$$

### Пример решения оптимизационной задачи

Выбранные требования технического задания для трех параметров  $y_1^{\text{ТЗ}}$ ,  $y_2^{\text{ТЗ}}$  и  $y_3^{\text{ТЗ}}$ , приведены в табл. 1. Эти значения используются при вычислении параметров для всех рассматриваемых вариантов построения сети.

**Таблица 1.** Требования ТЗ

Параметры заданные в ТЗ	Примечания
$y_1^{\text{ТЗ}} \leq 1,515 \left[ \frac{\text{сек}}{\text{Гбит}} \right]$	Данный параметр соответствует требуемому ресурсу $\frac{1}{y_1^{\text{ТЗ}}} > 0,66 \left[ \frac{\text{Гбит}}{\text{сек}} \right]$ , что позволяет предоставить каждому из 200 абонентов 1,1 комбинированную услугу на участке $Z = 50$ км. Требование $y_1^{\text{ТЗ}} \leq 1,515 \left[ \frac{\text{сек}}{\text{Гбит}} \right]$ задано в виде ограничения: «не более»
$y_2^{\text{ТЗ}} \leq 10^{-5}$ (вероятность битовой ошибки)	Качество передачи предлагается учитывать требованием вероятности битовой ошибки ( $P_{\text{в.б.о.}}$ ). Требование задано в виде ограничения: «не более»
$y_3^{\text{ТЗ}} \leq 6$ [млн \$ США]	Ограничение на цену указанного выше оборудования (БС и РТР) задано в виде: «не более»

В табл. 2 приведены данные для десяти вариантов. В ней обозначены: 5 вариантов  $(t_1), (t_2), (t_3), (t_4), (t_5)$  при  $f_c = 40$  ГГц; и 5 вариантов  $(t_6), (t_7), (t_8), (t_9), (t_{10})$  при  $f_c = 20$  ГГц. При этом коэффициент усиления антенны БС был принят для  $f_c = 40$  ГГц равным  $G_1^A = 40$  раз (16 дБ), а для антенны МТ  $G_2^A = 20$  раз (13 дБ). Для  $f_c = 20$  ГГц коэффициенты усиления антенн были заданы  $G_1^A = 20$  раз (13 дБ) и  $G_2^A = 10$  раз (10 дБ).

**Таблица 2.** Расчетные значения параметров

Параметры	Тактовое время, $t$									
	$t_1$	$t_2$	$t_3$	$t_4$	$t_5$	$t_6$	$t_7$	$t_8$	$t_9$	$t_{10}$
$f_c$ , ГГц	40	40	40	40	40	20	20	20	20	20
$G_1^A$ , раз	40	40	40	40	40	20	20	20	20	20
$G_2^A$ , раз	20	20	20	20	20	10	10	10	10	10
$T_{ш.вх.}^{MT}$ , [К]	1000	1000	6000	1000	1000	1000	1000	6000	1000	1000
$\Delta f_{ш}^{MT}$ , [МГц]	2	2	2	3,5	3,5	2	2	2	3,5	3,5
$A = P_c / P_{ш}$	16	10	16	16	10	16	10	16	16	10
$y_1$ , [сек/Гбит]	1,389	1,389	1,389	0,833	0,833	1,389	1,389	1,389	0,833	0,833
$y_2$	$10^{-7}$	$10^{-6}$	$10^{-7}$	$10^{-7}$	$10^{-6}$	$10^{-7}$	$10^{-6}$	$10^{-7}$	$10^{-7}$	$10^{-6}$
$y_3$ , [млн \$ США]	3,0	2,4	7,2	4,0	3,2	2,415	1,932	5,796	3,22	2,093

Параметр  $y_1$ , задан для первых трех вариантов на частоте  $f_c = 40$  ГГц  $(t_1, t_2, t_3)$  и на  $f_c = 20$  ГГц  $(t_6, t_7, t_8)$  равный  $y_1 = 1,389 \left[ \frac{\text{сек}}{\text{Гбит}} \right]$ , что соответствует ресурсу достаточному для передачи каждому из 200 абонентов 1,2 комбинированной услуги. Для вариантов  $t_4, t_5$  и  $t_9, t_{10}$  при соответствующих частотах сигнала  $f_c$  параметр  $y_1 = 0,833 \left[ \frac{\text{сек}}{\text{Гбит}} \right]$ , что соответствует по ресурсу предоставлению 2-х комбинированных услуг.

Параметр качества задан в вариантах  $t_1, t_3, t_4, t_6, t_8$  и  $t_9$  равным  $y_2 = 10^{-7}$ . Для вариантов  $t_2, t_5, t_7$  и  $t_{10}$  равным  $y_2 = 10^{-6}$ .

Параметр, характеризующий стоимость оборудования БС и РТР рассчитывается для двух разных классов приемного оборудования МТ. Первый класс (с малошумящим усилителем на входе) имеет суммарную эквивалентную шумовую температуру на входе приемного оборудования равную  $T_{ш.вх.}^{MT} = 1000$  К, второй класс (без малошумящего усилителя на входе)  $T_{ш.вх.}^{MT} = 6000$  К. Кроме того, приемник-декодер обеспечивает вероятность



битовой ошибки равную  $10^{-6}$ , либо  $10^{-7}$  при отношении  $P_c/P_{ш} = 10$ , либо 16 раз, соответственно. В зависимости от количества предоставляемых услуг учитывается разная полоса частот для определения мощности шумов  $P_{ш}$ : для 1,2 услуги  $\Delta f_{ш}^{MT} = 2$  МГц, для двух услуг  $\Delta f_{ш}^{MT} = 3,5$  МГц.

Сравнение вычисленных значений параметров с требованиями технического задания показывает, что 9 из 10 вариантов удовлетворяют требованиям ТЗ и только вариант  $t_3$  по параметру  $y_3$  не удовлетворяет требованию ТЗ. Вычисленные значения  $B_i$ ,  $R_i$  и ИКП приведены в табл. 3.

**Таблица 3.** Значение параметров

Параметры	Значения параметров									
	$t_1$	$t_2$	$t_3$	$t_4$	$t_5$	$t_6$	$t_7$	$t_8$	$t_9$	$t_{10}$
$B_1$	0,9168	0,9168	0,9168	0,5498	0,5498	0,9168	0,9168	0,9168	0,5498	0,5498
$B_2$	0,010	0,100	0,010	0,010	0,100	0,010	0,100	0,010	0,010	0,100
$B_3$	0,500	0,4	1,2	0,667	0,5333	0,403	0,322	0,966	0,537	0,349
$R$	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1
ИКП	$4,584 \cdot 10^{-3}$	$36,672 \cdot 10^{-3}$	–	$3,665 \cdot 10^{-3}$	$29,323 \cdot 10^{-3}$	$3,690 \cdot 10^{-3}$	$29,521 \cdot 10^{-3}$	$8,874 \cdot 10^{-3}$	$2,951 \cdot 10^{-3}$	$19,179 \cdot 10^{-3}$

Анализ данных примера приведенных в табл. 2 и 3 показал, что 6 вариантов из 10 (варианты:  $t_1$ ,  $t_3$ ,  $t_4$ ,  $t_6$ ,  $t_8$ ,  $t_9$ ) имеют значение ИКП  $< 20 \cdot 10^{-3}$ . Из них 3 варианта ( $t_4$ ,  $t_6$ ,  $t_9$ ) имеют значение ИКП  $\leq 3,69 \cdot 10^{-3}$ . Минимальное значение ИКП имеет вариант ( $t_9$ ), которое равно ИКП =  $2,95 \cdot 10^{-3}$ .

Вариант ( $t_9$ ) оптимален в том смысле, что он при некотором увеличении затрат на оборудование ( $y_3 = 3,22$  млн \$ США), по сравнению с вариантом ( $t_6$ ), у которого  $y_3 = 2,415$  млн \$ США, обеспечивает предоставление 2-х комбинированных услуг мобильному абоненту с качеством  $y_2 = 10^{-7}$ .

Интересны варианты ( $t_6$ ,  $t_{10}$ ):

- вариант ( $t_6$ ) обеспечивает одну комбинированную услугу с качеством  $y_2 = 10^{-7}$  при стоимости оборудования  $y_3 = 2,415$  млн \$ США;
- вариант ( $t_{10}$ ) обеспечивает две комбинированные услуги при самых низких затратах на оборудование ( $y_3 = 2,093$  млн \$ США). Однако этот вариант уступает другим по качеству ( $y_2 = 10^{-6}$ ).

## ВЫВОДЫ

1. Описан конкретный объект оптимизации в виде участка беспроводного доступа в интерактивной гетерогенной телекоммуникационной сети, разработана для него математическая постановка оптимизационной задачи, приведен пример решения оптимизационной задачи.

2. Показано, что математическая модель нашего объекта оптимизации может быть представлена моделью агрегативной системы и схемой конечного автомата — наиболее простой моделью дискретных динамических систем имеющих фиксированную структуру.

3. Разработанный алгоритм оптимизации в первой своей части осуществляет поиск возможных вариантов искомой системы, затем путем ранжирования вычисленных значений целевой функции определяет по интегральному критерию оптимальный вариант системы на дискретном множестве возможных вариантов системы.

4. ИКП — инструмент, позволяющий из большого числа возможных вариантов сети выделить несколько предпочтительных вариантов. Окончательное решение необходимо принимать, исходя из целого ряда условий системного подхода. Например, таких как: актуально ли требование обеспечения качества  $y_2 = 10^{-7}$  по сравнению с  $y_2 = 10^{-6}$ ; каковы экономические и временные показатели бизнес-плана и т.д.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Ильченко М.Е., Сундучков К.С., Волков С.Э., Сундучков И.К., Кузява М.А., Сундучков А.К. Интерактивная гетерогенная телекоммуникационная система 4G с беспроводным доступом в миллиметровом диапазоне для предоставления мультимедийных услуг мобильным абонентам // Зв'язок. — № 7–8. — 2008. — С. 28–32.
2. Бусленко Н.П., Калашиников В.В., Коваленко И.М. Лекции по теории сложных систем. — М.: Сов. Радио, 1973. — 440 с.
3. Основы моделирования сложных систем // Л.М. Дыхненко, В.Ф. Кабаненко, И.В. Кузьмин и др.: Под ред. И.В. Кузьмина. — Киев: Вища шк., 1981. — 360 с.
4. Автоматизированное проектирование электронных схем // Ю.М. Калниболотский, К.С. Сундучков, А.И. Солодовник. — Киев: Техника, 1987. — 301 с.
5. Конечные автоматы: эквивалентность и поведение // Н.Н. Иванов, Г.И. Михайлов, В.В. Руднев и др. — М.: Наука, 1984. — 192 с.
6. Сундучков К.С. Применение интегрального критерия предпочтения при оптимизации телекоммуникационных сетей // Радиотехника. — 2008. — Вып. 155. — С. 77–83.

Поступила 27.05.2009