

## Глава 2. Математические модели синтеза топологии сети для охвата линейного участка в виде задачи целлочисленного линейного

### 2.1 Постановка задачи

Проблема формулируется следующим образом. Для контроля над заданным линейным участком необходимо разместить базовые приемопередающие станции (далее называемые станциями) таким образом, чтобы максимизировать покрытие с ограничениями на суммарную стоимость размещенных станций. Важно обеспечить связи любой станции со шлюзами на концах участка через систему размещенных станций.

Задано множество станций  $S = \{s_j\}$ . Каждой станции приписаны параметры  $s_j = \{r_j, \{R_{jq}\}, c_j\}$ ,  $j = \overline{1, m}$ ;  $q = \overline{1, m}$ ;  $q \neq j$ . Здесь  $r_j$  – радиус покрытия станции,  $R_{jq}$  – это радиус связи между станциями  $s_j$  и  $s_q$ , и  $c_j$  – это стоимость.

Задан линейный участок длиной  $L$  с концами в точка  $a_0$  и  $a_{n+1}$ . Внутри отрезка  $[a_0, a_{n+1}]$  задано конечное множество точек  $A = \{a_i\}$ ,  $i = \overline{1, n}$ ; эти точки соответствуют набору свободных мест, где могут быть размещены станции. Каждая точка  $a_i$  определяется своей одномерной координатой  $l_i$ .

Заданы станции специального вида  $s_{m+1}$  – шлюзы. Данные шлюзы размещены на концах  $a_0$  и  $a_{n+1}$  данного линейного участка. Для данных станций параметр радиуса покрытия  $r_{m+1} = 0$ . Радиус связи и стоимость не заданы.

Требуется разместить станции таким образом, чтобы максимизировать покрытие с условием ограничения на суммарное стоимост  $C$ .

### 2.2 Расчет дальности действия связи

Перед тем как приступить к задаче ЦЛП необходимо рассчитать характеристики станции: радиус связи  $R_{jq}$  и радиус покрытия  $r_j$ .

При развертывания сети необходимо обеспечить максимальное покрытие данного участка связь между шлюзами через систему размещенных базовых станций беспроводной широкополосной сети.

Для оценки производительности канала связи воспользуемся уравнением энергетического потенциала. Полное уравнение можно записать следующим образом:

It is essential during deployment to provide maximum coverage of a given area and ensure communication between the placed base stations in the wireless broadband network.

Link Budget is a way of estimation of communication link's performance while accounting for the system's power, gains, and losses for both the transmitter and receiver. The complete equation can be written as follows:

$$P_{tr} - L_{tr} + G_{tr} - L_{fs} + G_{recv} - L_{recv} = SOM + P_{recv}, \quad (2.1)$$

где:

- $P_{tr}$  – мощность передатчика, дБм;
- $L_{tr}$  – потери сигнала на антенном кабеле и разъемах передающего тракта, дБ;
- $G_{tr}$  – усиление антенны передатчика, дБ;
- $L_{fs}$  – потери в свободном пространстве, дБ;
- $G_{recv}$  – усиление антенны приемника, дБ;
- $L_{recv}$  – потери сигнала на антенном кабеле и разъемах приемного тракта, дБ;
- $SOM$  – запас на замирание сигнала, дБ;
- $P_{recv}$  – чувствительность приемника, дБм.

Мощность принимаемой антенны рассчитывается из уравнения передачи Фрииса:

$$\frac{P_{recv}}{P_{tr}} = G_{tr} G_{recv} \left( \frac{c}{4\pi R f} \right)^2,$$

где  $c$  – скорость света,  $f$  – частота,  $R$  расстояние между приемной и передающей антенной.

The Free Space Path Loss (*FSPL*) equation defines the propagation signal loss between two antennas through free space (air):

Уравнение потерь в свободном пространстве (Free Space Path Loss, *FSPL*) определяет потерю сигнала при распространении между двумя антеннами в свободном пространстве (в воздухе):

$$FSPL = \left( \frac{4\pi Rf}{c} \right)^2. \quad (2.2)$$

Формула ((2.2)), выраженная в децибеллах будет выражаться как

$$L_{fs} = 20 \lg F + 20 \lg R + K, \quad (2.3)$$

где  $F$  – центральная частота, на котором работает канал связи,  $R$  – расстояние между приемной и передающей антенной и  $K$  – константа.

Константа  $K$  зависит от размерностей частоты и расстояния:

- для частоты, выраженной в ГГц, и расстояния, выраженная в км, константа  $K$  равна 92.45;
- для частоты, выраженной в МГц, и расстояния, выраженная в км, константа  $K$  равна 32.4;
- для частоты, выраженной в МГц, и расстояния, выраженная в м, константа  $K$  равна -27.55.

Потеря  $L_{fs}$  выразим из формулы ((2.1)) как:

$$L_{fs} = P_{tr} - L_{tr} + G_{tr} + G_{recv} - L_{recv} - SOM - P_{recv}. \quad (2.4)$$

Радиус связи получаем из уравнений ((2.3)) и ((2.4)):

$$R = 10^{\left( \frac{L_{fs} - 20 \lg F - K}{20} \right)}. \quad (2.5)$$

Используя формулу (2.5) и (2.4), мы можем рассчитать теоритическое максимальную дальность связи  $R_{jq}$  между базовыми станциями и радиусом покрытия  $r_j$  с предположением об отсутствии препятствий, отражений, влияния контуров местности и т. д. Это допущение приемлемо для нашего случая с открытой местностью.

Для расчета дальности связи  $R_{jq}$  (Рис. 2.1), базовые станции  $s_j$  и  $s_q$  будут рассматриваться как станции *передатчик* и *приемник*, соответственно. Будем считать, что станции оборудованы направленными антеннами с усилениями  $G_{tr}^R$  и  $G_{recv}^R$ .

Каждая базовая станция оснащена всенаправленной антенной с заданным усилением антенны  $G_{tr}^r$ . Данная антенн необходимо для покрытия заданной области.

Each base station is equipped with an omnidirectional antenna with given gain antenna  $G_{tr}^r$ . A station uses this antenna to cover a given area.

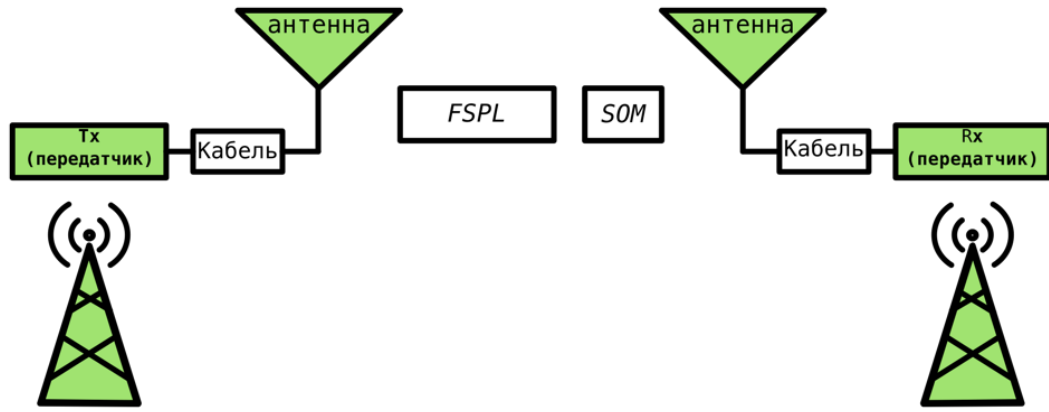


Рисунок 2.1 — Соединение между станциями.

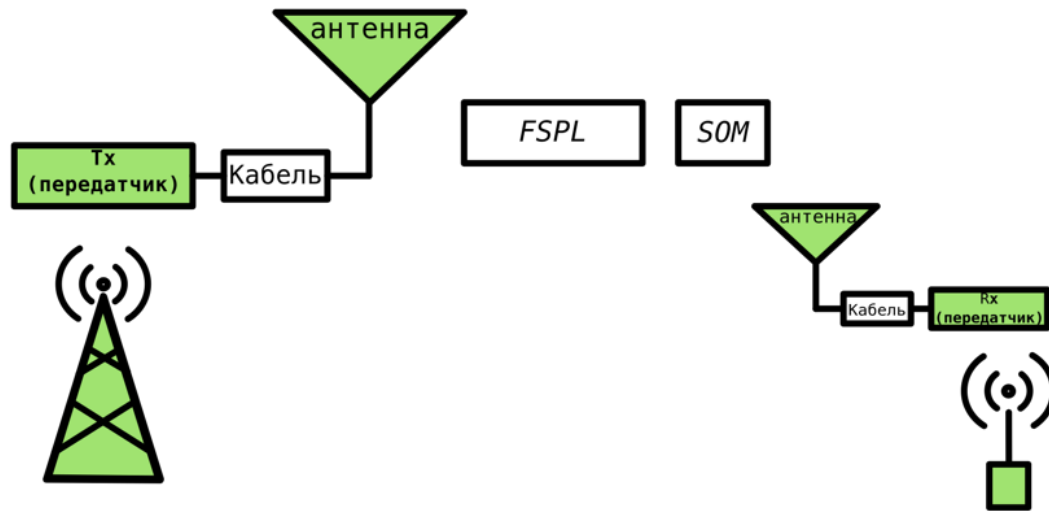


Рисунок 2.2 — Покрывтие станции

При вычислении радиуса покрытия  $r_j$  (Рис. 2.2) базовая станция будем считать *передатчиком* а пользовательское устройство *приемником*.

### 2.3 Модель ЦЛП

После оценки максимальных радиуса связи между станциями  $R_{jq}$ , максимального радиуса покрытия  $r_j$ , можно перейти, непосредственно, к задаче размещения станций в виде модели целочисленного линейного программирования.

Пусть  $y_i^+$  и  $y_i^-$ ,  $i = \overline{0, n+1}$  определяют охват покрытия (справа и слева, соответственно) станций, покрывающих точку  $a_i$ . Параметры  $y_i^+$  и  $y_i^-$  могут принимать только неотрицательные целые значения.

Величины покрытия для шлюзов  $y_0^+, y_0^-, y_{n+1}^+, y_{n+1}^-$  равны 0.

Целевая функция будет представлена как:

$$f = \sum_{i=1}^n (y_i^- + y_i^+) \rightarrow \max \quad (2.6)$$

Также введем бинарные переменные  $x_{ij}$ . Тогда  $x_{ij} = 1$ , если станция  $s_j$ , размещенная на точке  $a_i$ , и  $x_{ij} = 0$  в противном случае;  $i = \overline{1, n}$ ;  $j = \overline{1, m}$ .

Введем двоичные переменные  $e_i$ . Тогда  $e_i = 1$ , если какая-либо станция находится в точке  $a_i$ , и  $e_i = 0$  в противном случае;  $i = \overline{1, n}$ . Для точек размещения шлюзов  $a_0$  и  $a_{n+1}$  переменные  $e_0 = 1$  и  $e_{n+1} = 1$ , соответственно.

Сформулируем следующую систему ограничений задачи.

По определению (2.7):

$$e_i = \sum_{j=1}^m x_{ij}, \quad i = \overline{1, n}. \quad (2.7)$$

Каждая станция должна быть размещена только в одной точке. (2.8):

$$\sum_{j=1}^m x_{ij} \leq 1, \quad j = \overline{1, m}. \quad (2.8)$$

Значения покрытий не превышают радиус покрытия станции, размещенной в точке  $a_i$ , и равны 0, если в точке  $a_i$  нет станции (2.9) и (2.10):

$$y_i^+ \leq \sum_{j=1}^m x_{ij} \cdot r_j, \quad i = \overline{1, n}; \quad (2.9)$$

$$y_i^- \leq \sum_{j=1}^m x_{ij} \cdot r_j, \quad i = \overline{1, n}. \quad (2.10)$$

Общая область покрытия между любыми двумя точками  $a_i$  и  $a_k$ , где расположены станции, не может превышать расстояние между этими точками (2.11) и (2.12).

$$y_i^+ + y_k^- \leq \frac{l_k - l_i}{2} \cdot (e_i + e_k) + (2 - e_i - e_k) \cdot L, \quad i = \overline{1, n}, \quad k = \overline{i + 1, n + 1}; \quad (2.11)$$

$$y_i^- + y_k^+ \leq \frac{l_i - l_k}{2} \cdot (e_i + e_k) + (2 - e_i - e_k) \cdot L, \quad i = \overline{1, n}, \quad k = \overline{i - 1, 0}, \quad (2.12)$$

где  $l_k$  и  $l_i$  - координаты точек  $a_i$  и  $a_k$ , соответственно. Это условие исключает влияние пересечений покрытий станций при вычислении общего значения покрытия между станциями.

Согласно условиям задачи, станция, расположенная в  $a_i$ , должна быть связана хотя бы с одной станцией слева и одной станцией справа, включая станции на конечных точках  $a_0$  и  $a_{n+1}$ .

Введем бинарные переменные  $z_{ijkq}, i = \overline{1, n}; j = \overline{1, m}; k = \overline{1, n}, k \neq i; q = \overline{1, m}, q \neq j$ .

Переменная  $z_{ijkq} = 1$ , если в точке  $a_i$  размещена станция  $s_j$  и данная станция связана со станцией  $s_q$ , размещенная в точке  $a_k$ ; и  $z_{ijkq} = 0$  в противном случае.

Переменная  $z_{ij0(m+1)} = 1$ , если станция  $s_j$ , размещенная в точке  $a_i$ , связана со шлюзом  $s_{m+1}$  в точке  $a_0$ ;  $z_{ij0(m+1)} = 0$  в противном случае.

Переменная  $z_{ij(n+1)(m+1)} = 1$ , если здесь находится станция  $s_j$  в точке  $a_i$  и она связана со шлюзом  $s_{m+1}$  в точке  $a_{n+1}$ ;  $z_{ij0(m+1)} = 0$  в противном случае.

Станции должны быть размещены в обеих точках  $a_i$  и  $a_k$ , (2.13) и (2.14):

$$z_{ijkq} \leq e_i, \quad i = \overline{1, n}; \quad j = \overline{1, m}; \quad k = \overline{1, n}, k \neq i; \quad q = \overline{1, m}, q \neq j; \quad (2.13)$$

$$z_{ijkq} \leq e_k, \quad k = \overline{1, n}; \quad j = \overline{1, m}; \quad i = \overline{1, n}, i \neq k; \quad q = \overline{1, m}, q \neq j. \quad (2.14)$$

Необходимо, чтобы станция  $s_j$  в точке  $a_i$  была связана с любой станцией, расположенной в точке  $a_k$ , справа от  $a_i$  ( $k > i$ ) или с правым шлюзом  $s_{m+1}$  (2.15) и (2.16).

$$\sum_{k=i+1}^n \sum_{\substack{q=1 \\ q \neq j}}^m z_{ijkq} + z_{ij(n+1)(m+1)} = x_{ij}, \quad i = \overline{1, n}, \quad j = \overline{1, m}. \quad (2.15)$$

Станция  $s_j$ , размещенная в  $a_n$ , справа связана только со шлюзом  $s_{m+1}$  на месте  $a_{n+1}$  (2.16).

$$z_{nj(n+1)(m+1)} = x_{nj} \quad j = \overline{1, m}. \quad (2.16)$$

Также станция должна быть связана с любой станцией, расположенной в точке  $a_k$  слева от точки  $a_i$  ( $k < i$ ) или с левым шлюзом  $s_{m+1}$  (2.17) и (2.18).

$$z_{1j0(m+1)} = x_{ij}, \quad j = \overline{1, m}; \quad (2.17)$$

Станция  $s_j$ , размещенная в точке  $a_1$  слева может быть связана только со шлюзом  $s_{m+1}$ , расположенном в точке  $a_0$  (2.17).

$$z_{ij0(m+1)} + \sum_{k=1}^{i-1} \sum_{\substack{q=1 \\ q \neq j}}^m z_{ijkq} = x_{ij}, \quad i = \overline{2, n}, \quad j = \overline{1, m}. \quad (2.18)$$

Необходимо, чтобы станция  $s_q$  в точке  $a_k$  была связана с любой станцией справа, расположенной в точке  $a_i$  (2.19).

$$\sum_{i=k+1}^n \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq q}}^m z_{ijkq} = x_{kq}, \quad k = \overline{1, n-1}, \quad q = \overline{1, m}; \quad (2.19)$$

Кроме того, станция  $s_q$  в точке  $a_k$  подключена к любой станции слева, расположенной в точке  $a_i$  (2.20).

$$\sum_{i=1}^k \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq q}}^m z_{ijkq} = x_{kq}, \quad k = \overline{2, n}, \quad q = \overline{1, m}; \quad (2.20)$$

Неравенства (2.13) и (2.14) и равенства (2.15) — (2.20) обеспечивают условие симметрии связи между базовыми станциями, расположенными в точках  $a_i$  и  $a_k$ ,  $\forall i, k$ .

Если станции  $s_j$  и  $s_q$  связаны, то максимальный радиус связи размещенных станций должен быть не меньше расстояния между точками  $a_i$  и  $a_k$ , где расположены станции  $s_i$  и  $s_q$ . Формально это можно записать как (2.21) и (2.22).

$$\forall i = \overline{1, n}:$$

$$z_{ijkq}(R_{jq} - (a_i - a_k)) \geq 0, \quad k = \overline{0, i-1}; \quad j = \overline{1, m}; \quad q = \overline{1, m}, q \neq j; \quad (2.21)$$

$$z_{ijkq}(R_{jq} - (a_k - a_i)) \geq 0, \quad k = \overline{i+1, n+1}; \quad j = \overline{1, m}; \quad q = \overline{1, m}, q \neq j. \quad (2.22)$$

И для бюджетного ограничения стоимости  $C$ :

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m x_{ij} \cdot c_j \leq C. \quad (2.23)$$

## 2.4 Численный пример

В этой секции представлен численный пример решения данной задачи.

Задан линейный участок  $L$  с длиной 300 с количеством  $n = 7$  точек размещения. Координаты точек размещения представлены в таблице 5. Задан бюджет размещения  $C = 130$ . Центральная частота  $f = 2437$  МГц.

$a_i$	$a_1$	$a_2$	$a_3$	$a_4$	$a_5$	$a_6$	$a_7$
Координата	29	40	95	139	181	230	273

Таблица 5 — Точки размещения участка с длиной  $L = 300$ .

Задано множества базовых станций  $m = 8$  с параметрами представленными в таблице 6. Также в таблице представлены параметры шлюзов и контролируемых объектов. Параметры объектов необходимы для расчета радиусов покрытия станций.

BS	$P_{tr}^R$	$G_{tr}^R$	$P_{recv}^R$	$P_{recv}^r$	$G_{recv}^r$	$c$
	dBm	dBi	dBm	dBm	dBi	c.u.
1	20	5	-69	-67	5	40
2	19	5	-67	-67	5	28
3	18	5	-69	-67	5	45
4	19	5	-69	-67	6	22
5	19	5	-67	-67	5	21
6	20	5	-69	-67	5	40
7	19	5	-67	-67	5	28
8	18	5	-69	-67	5	45
Шлюз	$G_{recv}^R$	$P_{recv}^R$		Объект	$P_{tr}^r$	$G_{tr}^r$
	dBi	dBm			dBm	dBi
	5	-69			15	2

Таблица 6 — Параметры базовых станций, шлюзов и объектов.



### 2.4.1 Расчет радиуса связи между станциями

Базовые станции оснащены направленной антенной с высоким коэффициентом усиления для связи с соседними станциями. Для расчета потерь между станциями  $j$  и  $q$  воспользуемся формулой (2.4):

$$L_{fs}^{jq} = P_{tr}^R(j) - L_{tr} + G_{tr}^R(j) + G_{tr}^R(q) - L_{recv} - SOM - P_{recv}^R(q).$$

Потери на кабелях приемника  $L_{recv}$  и передатчика  $L_{tr}$  примем равным 1 дБ и запас на замирания сигнала  $SOM = 10$  дБ.

Let us carry out an example of the calculation communication link between stations  $s_1$  and  $s_2$ : Для примера рассчитаем радиус связи между станциями  $s_1$  и  $s_2$ :

$$\begin{aligned} L_{fs}^{12} &= P_{tr}^R(1) - L_{tr} + G_{tr}^R(1) + G_{tr}^R(2) - L_{recv} - SOM - P_{recv}^R(2) = \\ &= 20 - 1 + 5 + 5 - 1 - 10 - (-69) = 87(dB). \end{aligned} \quad (2.24)$$

Для расчета канала связи необходимо использовать формулу (2.5). Несущая частота  $f = 2437$  МГц и коэффициент для расчета потерь  $K = -27,55$ :

$$R_{jq} = 10^{\left(\frac{L_{fs}^{jq} - 20 \lg F - K}{20}\right)} = 10^{\left(\frac{87 - 20 \lg 2437 - (-27.55)}{20}\right)} = 174(m). \quad (2.25)$$

В таблице 7 приведены расчеты максимальных радиусов связи между всеми станциями  $s_j$ ,  $j = 1, \dots, m$  и шлюзом  $s_{m+1}$ .

### 2.4.2 Расчет радиуса покрытия

Расчет проводится аналогично расчету радиусу связи между станциями. Потери в свободном пространстве для канала между  $j$ -ой станции и контролируемым объектом

$$L_{fs}^j = P_{tr}^r(j) - L_{tr} - SOM - P_{RX}.$$

$R_{jq}, (m)$	$s_1$	$s_2$	$s_3$	$s_4$	$s_5$	$s_6$	$s_7$	$s_8$	$s_{m+1}$
$s_1$	—	174	219	219	174	219	174	219	219
$s_2$	195	—	195	195	155	195	155	195	195
$s_3$	174	138	—	174	138	174	138	174	174
$s_4$	195	155	195	—	155	195	155	195	195
$s_5$	195	155	195	195	—	195	155	195	195
$s_6$	219	174	219	219	174	—	174	219	219
$s_7$	195	155	195	195	155	195	—	195	195
$s_8$	174	138	174	174	138	174	138	—	174

Таблица 7 — Рассчитанные радиусы связи между станциями

Пример расчета радиуса покрытия для 1-ой станции:

$$L_{fs}^1 = P_{tr}^r + G_{tr}^r + G_{recv}^r(1) - L_{recv}(1) - SOM - P_{recv}^r(1) = 15 + 2 + 5 - 1 - (-67) - 10 = 78.$$

$$r_1 = 10^{\left(\frac{78 - 20 \lg 2437 - (-27.55)}{20}\right)} = 77(m)$$

Рассчитанные радиусы покрытия для всех станций  $s_j$ ,  $j = \overline{1, m}$  представлены в таблице 8).

STA	$s_1$	$s_2$	$s_3$	$s_4$	$s_5$	$s_6$	$s_7$	$s_8$
$r_j$	77	77	77	87	77	77	77	77

Таблица 8 — Рассчитанные радиусы покрытия станций

Задача ЦЛП решена с помощью Optimization Toolbox MatLab. Таблица 9 содержит все возможные целочисленные решения.

$a_i$	$a_1$	$a_2$	$a_3$	$a_4$	$a_5$	$a_6$	$a_7$	Coverage	Cost
Point	29	40	95	139	181	230	273	m	с.и.
Feasible solution 1	$s_1$	$s_2$	$s_6$	—	—	—	$s_4$	286	130
Feasible solution 2	$s_4$	—	$s_5$	$s_7$	—	—	$s_2$	289	99
Optimal solution	$s_4$	$s_2$	—	—	$s_1$	—	$s_5$	300	111

Таблица 9 — ILP solution.

## 2.5 Example

Let's look at one simple case of base stations placement problem.

Consider the section of length  $L = 400$  with  $n = 10$  placement points is given in table 10:

$a_i$	$a_1$	$a_2$	$a_3$	$a_4$	$a_5$	$a_6$	$a_7$	$a_8$	$a_9$	$a_{10}$
coordination	32	65	101	142	181	241	270	301	325	380

Таблица 10 — Placement points at the section of length  $L = 400$ .

There are  $m = 7$  base stations with parameters given in table 11:

- $P_{tr}^R$  is a transmit power for communication with base stations;
- $G_{tr}^R$  is an antenna gain for communication with base stations;
- $P_{recv}^R$  is a sensitivity for communication with base stations;
- $P_{tr}^r$  is a transmit power for the coverage of section;
- $G_{tr}^r$  is an antenna gain for the coverage of section;
- $p$  is a throughput;
- $c$  is a base station cost.

BS	$P_{tr}^R$	$G_{tr}^R$	$P_{recv}^R$	$P_{tr}^r$	$G_{tr}^r$	$p$	$c$
No	[dBm]	[dBi]	[dBm]	[dBm]	[dBi]	Mbit/s	c.u.
1	19	5	-69	20	2	54	2300
2	19	4	-80	19	3	54	1200
3	19	6	-69	18	2	54	4500
4	19	5	-83	18	3	54	6000
5	20	5	-85	20	2	54	3500
6	22	5	-69	18	2	54	4200
7	19	5	-69	18	2	54	4200

Таблица 11 — Base station parameters.

Finally, gateway stations of special type  $s_{m+1}$  placed on the ends of the segment are specified. Gateway parameters is given in table 12:

Gateway	$G_{tr}^R$	$P_{recv}^R$
No	[dBi]	[dBm]
$s_{m+1}$	3	-69

Таблица 12 — Gateway parameters.

### 2.5.1 Computation of the communication link distance between base stations

Base station is equipped with a directional antenna with a high gain to communicate with neighbouring stations. To calculate the losses between stations  $j$  and  $q$ , we use the formula (??):

$$L_{fs}^{jq} = P_{tr}^R(j) - L_{tr} + G_{tr}^R(j) + G_{tr}^R(q) - L_{recv} - SOM - P_{recv}^R(q).$$

The cable losses at the receiver  $L_{recv}$  and transmitter  $L_{tr}$  are equal to 1 dB. We will also provide system operating margin  $SOM = 10$  dB.

Let us carry out an example of the calculation communication link between stations  $s_1$  and  $s_2$ :

$$\begin{aligned} L_{fs}^{12} &= P_{tr}^R(1) - L_{tr} + G_{tr}^R(1) + G_{tr}^R(2) - L_{recv} - SOM - P_{recv}^R(2) = \\ &= 19 - 1 + 5 + 4 - 1 - 10 - (-80) = 96(dB). \end{aligned} \quad (2.26)$$

To calculate the communication link, formula ( ?? ) must be used. The stations operate on 6th channel, carrier frequency  $f = 2437$  MHz and coefficient  $K = -27.55$ :

$$R_{jq} = 10^{\left( \frac{L_{fs}^{jq} - 20 \lg F - K}{20} \right)} = 10^{\left( \frac{96 - 20 \lg 2437 - (-27.55)}{20} \right)} = 617(m). \quad (2.27)$$

Table 13 summarizes the maximal communication link distances calculations between all stations  $s_j$ ,  $j = 1, \dots, m$ , and the gateway  $s_{m+1}$ .

$R_{jq}, (m)$	$s_1$	$s_2$	$s_3$	$s_4$	$s_5$	$s_6$	$s_7$	$s_{m+1}$
$s_1$	–	617	219	978	1 232	195	195	123
$s_2$	174	–	195	872	1 098	174	174	109
$s_3$	219	692	–	1098	1 382	219	219	138
$s_4$	195	617	219	–	1 232	195	195	123
$s_5$	219	692	245	1 098	–	219	219	138
$s_6$	275	872	309	1 382	1 740	–	275	174
$s_7$	195	617	219	978	1 232	195	–	123

Таблица 13 — The calculation of communication link distance between stations.

### 2.5.2 Computation of the coverage radius

To cover a given section, the base station is equipped with an isotropic antenna with output power  $P_{tr}^r$  and gain  $G_{tr}^r$  is equal to 0. The cable loss  $L_{tr}$  is equal to 1.

A coverage area depends on a base station, as well as user device characteristics. Let us consider a user device with an antenna sensitivity  $P_{RX} = -67$  dBm and gain  $G_{RX} = 0$ . Loss  $L_{RX}$  is equal to 0.

Free space path loss between the  $j$ -th station and the user device

$$L_{fs}^j = P_{tr}^r(j) - L_{tr} - SOM - P_{RX}.$$

To calculate the coverage radius, must be used the formula (??). The stations operate on 6th channel, carrier frequency  $f = 2437$  MHz. and coefficient  $K = -27.55$

$$r_j = 10^{\left(\frac{L_{fs}^j - 20 \lg F - K}{20}\right)}.$$

An example of calculating the coverage radius for the 1-st station:

$$r_1 = 10^{\left(\frac{20 - 1 + 2 - 10 - (-67) - 20 \lg 2437 - (-27.55)}{20}\right)} = 77(m)$$

Let's calculate the coverage radius for all stations  $s_j$ ,  $j = 1, \dots, m$  (table 14).

STA	$s_1$	$s_2$	$s_3$	$s_4$	$s_5$	$s_6$	$s_7$
$r_j$	77	77	61	69	77	61	61

Таблица 14 — Calculation of the coverage radius of stations.

### 2.5.3 Time delay calculation

Let's calculate the delay for station  $s_1$ . The specified throughput is  $p_1 = 54$  Mbit/s. Let's assume that the average package size is  $w = 2700$  KByte (21.6 MBit). The arrival package rate is  $\lambda = 0.5(s^{-1})$ . Then the service rate according to the formula (??) will be

$$\mu_1 = \frac{54}{21.6} = 2.5(s^{-1}).$$

The utilization is equal to

$$\rho_1 = \frac{0.5}{2.5} = 0.2.$$

The average package size is

$$\bar{N}_1 = \frac{0.2}{1 - 0.2} = 0.25.$$

The average delay is

$$\bar{T}_1 = \frac{0.25}{0.5} = 0.5(s).$$

Communication links between stations  $R_{jq}$ , the coverage radius of the station is  $r_j$ , the delays  $\bar{T}_j$  are calculated, it is possible to search the optimal placement.

The problem formulated on the basis of (??) - (??) and given constraints on the cost  $C = 18000$  and end-to-end delay  $T = 3$  was solved by MATLAB Optimization Toolbox.

The optimal placement is presented in the table 15.

Placed station	$s_6$	$s_7$	—	—	$s_2$	—	$s_5$	—	$s_1$	—
Placement coordination	$a_1$	$a_2$	$a_3$	$a_4$	$a_5$	$a_6$	$a_7$	$a_8$	$a_9$	$a_{10}$

Таблица 15 — Solution result.

Obtained total coverage  $f$  is equal to 400 (m) with total cost  $c$  is equal to 15400 (c.u.), and end-to-end delay  $T$  is equal to 2.5 (s).

## 2.6 Conclusion

The paper considers the problem of finding an optimal placement of the given redundant set of base stations of wireless broadband communication network on a set of possible placement points to maximize the coverage area while respecting technological conditions and budget constraints.

To calculate a limit on the network delay time a network is considered as a tandem queue model with  $M/M/1$  nodes.

The problem is formulated in the form of the integer linear programming model. Numerical example solution was presented.

It is planned to use the obtained model in practice in future work.