

НАСТРОЙКА ДИАГРАММ НАПРАВЛЕННОСТИ АНТЕНН ДЛЯ ШИРОКОВЕЩАТЕЛЬНЫХ КАНАЛОВ УПРАВЛЕНИЯ СЕТИ МАКВИЛ НА ОСНОВЕ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

О.А. Шорин, д.т.н., профессор, Московский технический университет связи и информатики, oshorin@nxtt.org;

И. Агран, Московский технический университет связи и информатики.

УДК 621.391

Аннотация. Разработана методика и программа настройки диаграмм направленности многоэлементных антенных систем базовых станций сети связи МАКВИЛ для организации широковещательных каналов управления. Применена техника машинного обучения, учитывающая технологическую особенность системы, связанную с необходимостью управления диаграммами путем настройки только фаз сигналов, транслируемых в антенных каналах. Установлено, что предложенная методика и получаемые на ее основе диаграммы направленности позволяют в несколько раз сократить количество базовых станций, обслуживающих выделенную территорию. Особенно значимые результаты наблюдаются для территорий со сложным рельефом местности и зонами высокой локальной контрастности плотности размещения абонентов. На примере г. Новороссийска показано, как с помощью двух БС можно обеспечить покрытие 85% городской территории.

Ключевые слова: базовая станция; многоэлементная антенная решетка; диаграмма направленности; весовые коэффициенты; машинное обучение; градиентный адаптивный алгоритм; широковещательный канал управления.

CONFIGURING ANTENNA PATTERNS FOR BROADCAST CONTROL CHANNELS OF THE MCWILL NETWORK BASED ON MACHINE LEARNING

Oleg Shorin, Doctor of Technical Sciences, Professor, Moscow technical university of communications and informatics;

Ishrak Agran, Moscow technical university of communications and informatics.

Annotation. A methodology and a program for setting up directional patterns of multi-element antenna systems of the base stations of the *McWiLL* communication network for the organization of broadcast control channels has been developed. The machine learning technique is applied, taking into account the technological feature of the system associated with the need to control diagrams by adjusting only the phases of signals transmitted in antenna channels. It has been established that the proposed methodology and the directional patterns obtained on its basis make it possible to reduce the number of base stations serving the allocated territory several times. Particularly significant results are observed for territories with complex terrain and areas of high local contrast density of subscribers. The example of Novorossiysk shows how with the help of two BS it is possible to provide coverage of 85% of the urban area.

Keywords: base station, multi-element antenna array, directional pattern, weight coefficients, machine learning, gradient adaptive algorithm, broadcast control channel.

Введение

Основным требованием, предъявляемым к сетям и системам радиосвязи на современном этапе, является высокая экономическая эффективность. Достигнуть

ее возможно только при существенном сокращении затрат, связанных с капитальным строительством (*CAPEX*) и с оплатой арендуемых ресурсов радиоканала (*OPEX*). Поэтому при развертывании и эксплуатации указанных сетей и систем возникает задача максимального сокращения числа базовых станций (БС) при условии сохранения показателей качества связи на обслуживаемой территории. Для систем профессиональной радиосвязи, как правило, не требуется высокая производительность, но сохраняются высокие требования к организации сплошного покрытия.

Система профессиональной связи подвижных абонентов МАКВИЛ не является исключением из общего правила [1, 2]. В отличие от других систем и сетей связи поколения 4G, в МАКВИЛ на каждой БС используется многоэлементная антенная решетка, осуществляющая адаптивное управление лучами индивидуальных диаграмм направленности (ДН), сопровождающих перемещающихся абонентов, с одновременным подавлением сигналов в направлениях источников помех¹ [1, 3]. В ближайшие планы входят применение методов пеленга со сверхразрешением [4, 5], подключения полноценного режима ММО [6-8] и усовершенствованная обработка с применением новых схем модуляции [9-12]. Поэтому энергетический бюджет радиолиний подключения абонентов в МАКВИЛ имеет очень высокие показатели. Число БС, обеспечивающих покрытие территории при работе с абонентами, оказывается в несколько раз меньше числа БС, необходимого для тех же целей в известных системах поколения 4G с фиксированной секторной организацией [13]. Главный показатель, определяющий эффективность покрытия сети МАКВИЛ, оказывается связанным с широкополосными каналами управления, которые должны обеспечивать работу с абонентской аппаратурой начальных версий без поддержки адаптивной пространственной селекции сигналов. Дефолтные установки МАКВИЛ, обеспечивающие либо круговую ДН, либо полукруговую ДН для каналов широкополосного управления, зачастую оказываются далеко не оптимальными. Более точные настройки с учетом рельефа местности и локальных концентраций сосредоточения абонентов позволят более эффективно использовать ресурсы радиоканала в целом и сократить требуемое число БС.

Целью данной работы является разработка программно-вычислительного инструмента расчета весовых коэффициентов многоэлементной антенной решетки отдельной БС сети МАКВИЛ, формирующего ДН широкополосных каналов управления, наилучшим образом согласующуюся с эталоном, сгенерированным методами машинного обучения.

Схема формирования диаграммы направленности антенны БС для широкополосных каналов сети МАКВИЛ

На рис. 1а, 1б, 1в показаны типовые многоэлементные антенные системы, применяемые на БС сети МАКВИЛ в диапазонах 350 МГц, 420 МГц и 1800 МГц, соответственно.

¹ ГОСТ Р 58166-2018. Технические требования к радиоинтерфейсу широкополосной подвижной радиосвязи (ШПР). Организация протоколов и алгоритмов работы на канальном и физическом уровнях. Основные параметры и технические требования. – М.: Стандартинформ, 2018. – 142 с.

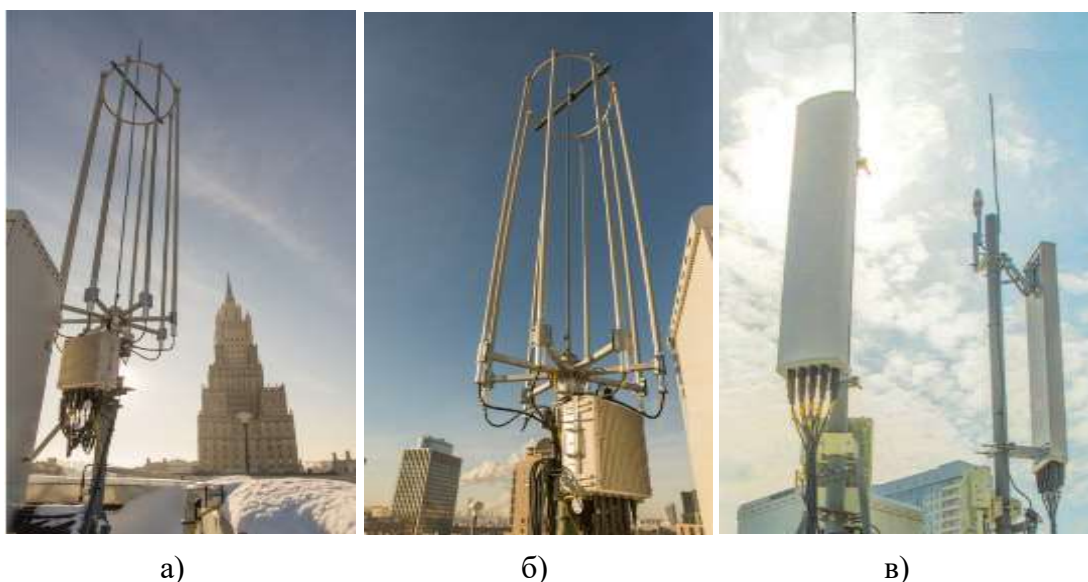


Рисунок 1

Формирование ДН широковещательных каналов (к ним относятся сигнал преамбулы и сигнал ВСН, содержащий системную информацию, необходимую для подключения к сети) реализуется в МАКВИЛ цифровым способом путем настройки весовых коэффициентов синфазных $W0_{I_i}$ и ортогональных $W0_{Q_i}$, квадратурных каналов каждого антенного тракта $i=1,2, \dots, N_a$, где N_a – число антенных элементов. Для стандартной конфигурации $N_a = 8$.

На рис. 2 показана укрупненная блок-схема формирования ДН широковещательных каналов сети МАКВИЛ. Настраиваемые весовые коэффициенты $W0_{I_i}$ и $W0_{Q_i}$ могут принимать значения из диапазона $[-1; +1]$ так, что для каждого канала выполняется неравенство:

$$(W0_{I_i}^2 + W0_{Q_i}^2) \leq 1, \text{ для любого } i = 1, 2, \dots, N_a. \quad (1)$$

В каждом антенном канале используется собственный усилитель мощности (УМ) с заданным предельным уровнем сигнала, формируемого на выходе. Поэтому, как только для какого-то антенного канала номер i неравенство (1) становится строгим, возникает принудительное уменьшение общей мощности трансляции в широковещательных каналах управления. Такое ограничение не является оправданным, поскольку может приводить только к сокращению зоны обслуживания БС. На этом основании режим управления весами следует производить при ограничениях с заменой условий (1) на равенства. Фактически это означает управление только фазами сигналов на входах УМ антенных каналов. Принудительное уменьшение мощности каналов управления может использоваться только в специфических случаях, требующих специального сокращения зоны обслуживания БС. При этом наиболее рациональным способом такого сокращения представляется использование ограничений вида:

$$(W0_{I_i}^2 + W0_{Q_i}^2) = a^2 < 1, \text{ для } i = 1, 2, \dots, N_a. \quad (2)$$

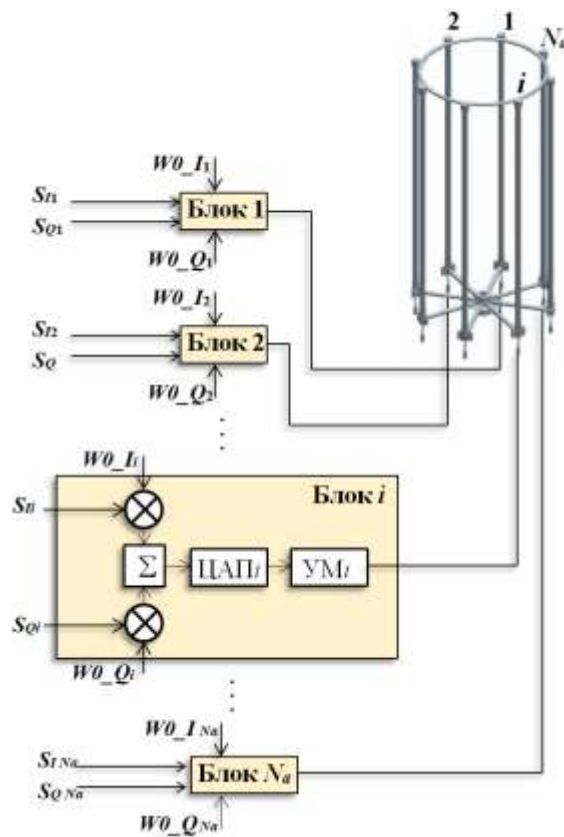


Рисунок 2

Алгоритмы настройки весовых коэффициентов для формирования диаграмм направленности антенн в широкополосных каналах управления

В качестве начальных условий настройки весовых коэффициентов, а вместе с ними и ДН антенной системы БС, использовались:

- 1) желательная эталонная форма ДН;
- 2) число антенных элементов, составляющих многоэлементную систему БС;
- 3) геометрия расположения отдельных антенн, составляющих многоэлементную систему;
- 4) амплитудная и фазовая составляющие ДН отдельной антенны;
- 5) функция штрафов за отклонения формируемой ДН от заданной эталонной формы.

Вышеперечисленные показатели задаются оператором, исходя из конкретных условий. На их основе программа машинного обучения в сочетании с алгоритмом адаптивной настройки весов формировала искомую ДН. В качестве указанного алгоритма адаптивной настройки весов использовался градиентный пошаговый алгоритм с набором минимизируемых целевых функций вида:

$$J(\vec{W}0|M) = \sum_{k=0}^{359} V(\varphi_k) \left| D_s(\varphi_k) - D(\varphi_k | \vec{W}0, N_a, \vec{P}_x, \vec{P}_y) \right|^M, \quad (3)$$

где: $M = 1, 2, 4, 6, 8, 16$ – показатель степени, используемый при расчете невязки между эталонной ДН и ДН антенной системы БС, $V(\varphi_k)$ – функция штрафа за

ошибку настройки ДН в азимутальном направлении $\varphi_k = k \times 1^\circ$ ($k=0... 359$), $D_S(\varphi_k)$ – желательная эталонная форма азимутальной ДН, построенная в направлениях $\varphi_k = k \times 1^\circ$ ($k=0... 359$), $D(\varphi_k | \vec{W}0, N_a, \vec{P}_x, \vec{P}_y)$ – азимутальная ДН антенной системы БС, формируемая в направлениях $\varphi_k = k \times 1^\circ$ ($k=0... 359$) для заданных параметров:

- 1) N_a – число антенн;
- 2) $\vec{W}0 = (W0_{I_1}, \dots, W0_{I_{N_a}}, W0_{Q_1}, \dots, W0_{Q_{N_a}})^T$ – вектор весовых коэффициентов;
- 3) $\vec{P}_x = (x_1, \dots, x_{N_a})^T$, $\vec{P}_y = (y_1, \dots, y_{N_a})^T$ – векторы x и y координат оптических центров антенных элементов в проекции на азимутальную плоскость.

Для каждого значения показателя степени M , используемого в (3), градиентный алгоритм настройки весов, с учетом ограничений (3), будет иметь вид [14]:

$$\begin{cases} W0_{I_i}(n) = \cos(\psi_i(n)), & W0_{Q_i}(n) = \sin(\psi_i(n)), \\ \psi_i(n+1) = \psi_i(n) - \mu \left(-\frac{\partial J(\vec{W}0(n)|M)}{\partial W0_{I_i}(n)} W0_{Q_i}(n) + \frac{\partial J(\vec{W}0(n)|M)}{\partial W0_{Q_i}(n)} W0_{I_i}(n) \right), \\ i=1, 2, \dots, N_a, \quad n=0, 1, 2, \dots, \end{cases} \quad (4)$$

где: n – номер шага настройки; $W0_{I_i}(n)$, $W0_{Q_i}(n)$ – весовые коэффициенты, сформированные градиентным алгоритмом на шаге настройки n ; $J(\vec{W}0(n)|M)$ – целевая функция невязки (3), построенная для весового вектора $\vec{W}0(n) = (W0_{I_1}(n), \dots, W0_{I_{N_a}}(n), W0_{Q_1}(n), \dots, W0_{Q_{N_a}}(n))^T$; μ – шаг настройки градиентного алгоритма; $\psi_i(n)$ – вспомогательные параметры фазы, принимающие нулевые значения в начальном состоянии $\psi_i(0) = 0$.

Остановка работы градиентного алгоритма (4) выполнялась на шаге n по выполнению условия:

$$J(\vec{W}0(n+1)|M) > J(\vec{W}0(n)|M). \quad (5)$$

При программировании градиентного алгоритма (4) также учитывалась возможность использования антенных элементов с азимутальными ДН, отличными от круговых. Поэтому помимо координат $\vec{P}_x = (x_1, \dots, x_{N_a})^T$, $\vec{P}_y = (y_1, \dots, y_{N_a})^T$ оператору предлагается устанавливать азимуты главных лепестков ДН антенных элементов $\Phi_1, \Phi_2, \dots, \Phi_{N_a}$. Но при использовании штатных антенных элементов МАКВИЛ с круговыми ДН, работа алгоритма и результаты оказываются независимыми от указанных азимутальных параметров.

Программа настройки весовых коэффициентов, формирующая диаграммы направленности антенн

Задача формирования ДН антенн для широкополосных каналов не требует решения в реальном масштабе времени. Процедура ввода в эксплуатацию как новых сегментов сетей, так и отдельных БС осуществляется, как правило, поэтапно и занимает от нескольких дней до месяцев. Поэтому к производительности программы настройки ДН широкополосных каналов не предъявляются высокие требования. Вполне допустимыми представляются вычислительные затраты в пределах суток. Поэтому для современных ПК оказалось возможным реализовать работу алгоритмов (4) в сочетании с машинным обучением на базе простых *VBA Excel*-макросов. В течение нескольких часов они формируют оптимизированные решения, генерируют визуализированные отчеты и предоставляют численные оценки достигнутых технических показателей. При этом оказывается возможным использовать удобный интерфейс *Excel*, формировать отчеты с использованием графиков, накладываемых на карты местности, включать дополнительные расчетные показатели в случае необходимости. Широкая и повсеместная освоенность интерфейса *Excel* пользователями ПК снимает психологический барьер начального освоения разработанной программы.

На рис. 3 показан интерфейс программы настройки весовых коэффициентов, формирующей ДН антенн для широкополосных каналов управления сети МАКВИЛ.

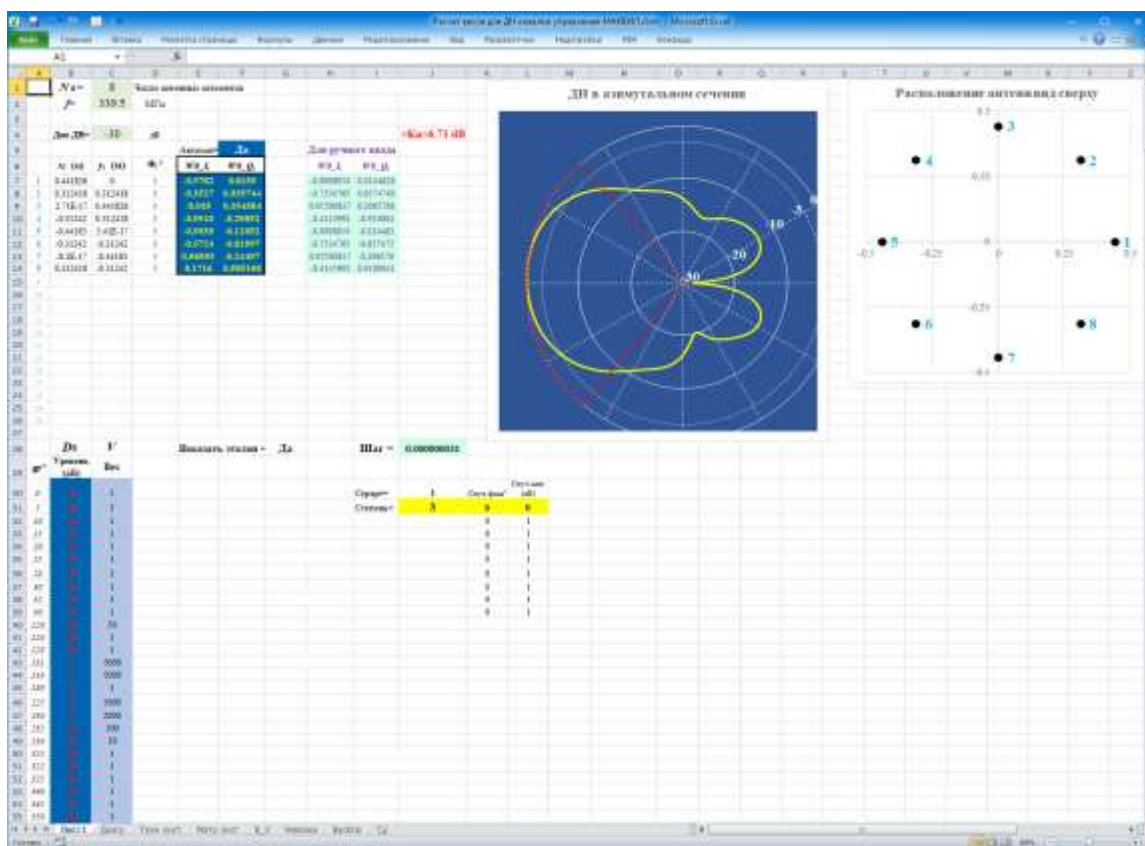


Рисунок 3

Рис. 4 в увеличенном масштабе поясняет как устанавливается: в ячейке «C1» – число антенн; в «C2» – частота несущего колебания; в диапазоне «B7:C26» – координаты расположения антенных элементов в проекции на азимутальную

плоскость; в диапазоне «D7:D26» – углы поворотов главных лепестков ДН антенных элементов. При изменении числа антенных элементов и их координат размещения автоматически корректируется визуальная схема расположения, присутствующая в правой верхней части рис. 3.

На рис. 5 показаны поля установки эталонной формы азимутальной ДН $D_s(\varphi_k)$ и функции штрафов $V(\varphi_k)$ за ошибки настройки. В промежуточных азимутальных позициях между опорными точками эталонной диаграммы, расположенными в столбце «А», начиная со строки 30, значения ДН и функции штрафов формируются с помощью линейной интерполяции. Если в ячейке «G28» установлено «Да», то на схеме ДН, показанной по центру в верхней части рис. 3, автоматически с помощью штриховой красной линии прорисовывается эталонная ДН. Если в ячейке «G28» убрать признак «Да», то на схеме эталонная ДН прорисовываться не будет.

Желтым цветом на схеме ДН отображается синтезированная ДН антенной системы БС МАКВИЛ, соответствующая сформированным весовым коэффициентам, автоматически записываемым алгоритмом настройки в рабочие ячейки области «E7:F26».

№	X_i (м)	Y_i (м)	Φ_i°	W_x	W_y
1	0.44183	0	0	0.57819	0.8159001
2	0.31242	0.31242	0	-0.35268	0.9357436
3	2.7E-17	0.44183	0	-0.93502	0.354584
4	-0.31242	0.31242	0	0.95428	-0.298922
5	-0.44183	5.4E-17	0	-0.99387	-0.1105111
6	-0.31242	-0.31242	0	-0.57241	-0.81997
7	-8.1E-17	-0.44183	0	0.96953	-0.244972
8	0.31242	-0.31242	0	0.1716	0.9881676

Рисунок 4

Φ°	D_s Уровень (дБ)	V Вес
30	0	1
31	0	1
32	10	1
33	20	1
34	30	1
35	30	1
36	30	1
37	30	1
38	30	1
39	30	1
40	120	30
41	120	1
42	120	1
43	141	5000
44	141	5000
45	168	1
46	225	5000
47	240	2000
48	242	100
49	244	10
50	325	1
51	332	1
52	333	1
53	340	1
54	342	1
55	350	1
56	353	1
57	358	1

Рисунок 5

В ячейку «J4» программа записывает добавку к коэффициенту усиления антенной системы, получаемую за счет настройки ДН в азимутальной плоскости.

Выбирая в ячейках «K31», «L31» амплитуды случайных погрешностей для коэффициентов усиления и сдвигов фазы в трактах отдельных антенных элементов, можно на схеме ДН наглядно фиксировать искажения ДН антенной системы в целом.

На рис. 6 показана синтезированная ДН широкоэмиттерных каналов управления для БС МАКВИЛ, расположенных на телерадиовещательной вышке и в районе нефтебазы г. Новороссийска. При решении практических задач удобно в качестве фона ДН использовать карты реальной местности, как показано на рис. 6а и 6б, где точки размещения БС совмещены с реальными позициями (г. Новороссийск, телерадиовещательная вышка и район нефтебазы).



а)

б)

Рисунок 6

Машинное обучение выполняется путем последовательного проведения серии настроек, каждая из которых осуществляется на основе алгоритма (4) с правилом остановки (5), при случайном выборе показателя M . Если очередная настройка не приводит к уменьшению рассогласования ДН с эталоном, то программа восстанавливает значения весовых коэффициентов $WO_{I_1}, WO_{Q_1}, \dots, WO_{I_{Na}}, WO_{Q_{Na}}$, имевшихся на момент начала последней настройки, исключает из списка допустимых показатель M последней настройки и снова переходит к шагу случайного выбора показателя M для выполнения следующей попытки настройки. Если все допустимые значения показателя M оказываются испытанными и не дают уменьшения рассогласования, процедура обучения останавливается.

На рис. 7 показана блок-схема алгоритма работы программного модуля машинного обучения, формирующего ДН широковещательных каналов управления сети МАКВИЛ.

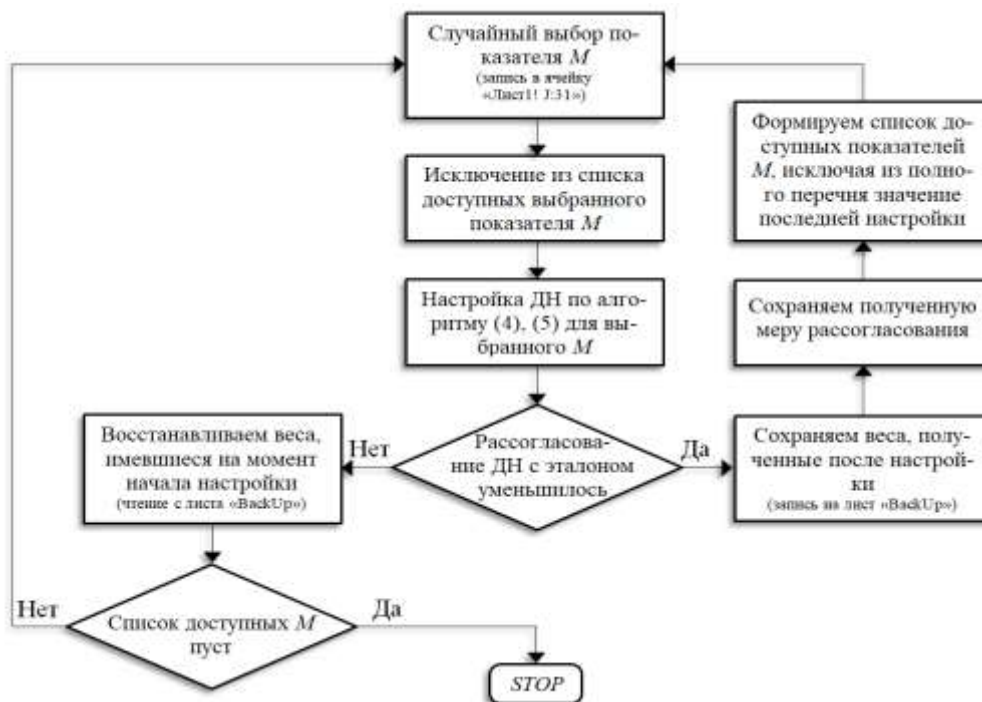


Рисунок 7

Практические результаты настройки диаграмм направленности широковещательных каналов сети МАКВИЛ

Разработанная методика настройки весовых коэффициентов многоэлементных антенн БС МАКВИЛ была применена для ряда практических ситуаций. Наиболее наглядные результаты достигались для территорий со сложным рельефом местности (в основном приморские зоны) и для кварталов городской ультраурбанистической застройки. Ниже в качестве примера приводятся ситуации планирования радиочастотного покрытия г. Новороссийска с акваторией порта и самого высокого небоскреба в Европе «Лахта-центр», расположенного в г. Санкт-Петербург.

Расчет ДН широковещательных каналов управления для г. Новороссийска показал возможность покрытия 85% территории, включая акваторию порта, с помощью только двух БС. Первая из указанных БС размещается на телерадиовещательной башне (рис. 8) с высотой подвеса антенн 154 м. Вторая – в прибрежной зоне на трубе, расположенной на территории нефтебазы (рис. 9).

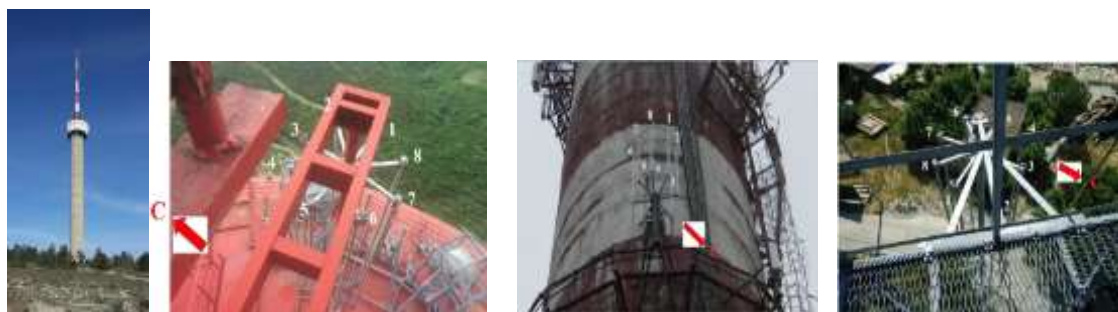


Рисунок 8

Рисунок 9

Результаты расчета ДН для указанных БС приведены на рис. 6. Полученные весовые коэффициенты даны в табл. 1 для БС на башне, в табл. 2 – для БС на трубе нефтебазы.

Таблица 1.

$w_0 I_i$	$w_0 Q_i$
-0,6663	-0,7452
0,9503	0,3114
-0,6461	0,7623
-0,7693	0,6404
-0,6618	0,7488
0,9456	-0,3247
-0,6592	-0,7522
-0,7523	-0,6598

Таблица 2.

$w_0 I_i$	$w_0 Q_i$
-0,5782	0,8159
-0,3527	0,9357
-0,9350	0,3546
-0,9543	-0,2989
-0,9939	-0,1105
-0,5724	-0,8200
0,9695	-0,2450
0,1716	0,9852

Дополнительное увеличение коэффициентов усиления антенн за счет азимутальной компоненты составило $\Delta K_{и} = 8,11$ дБ – для БС на телерадиовещательной башне и $\Delta K_{и} = 6,71$ дБ – для БС на трубе нефтебазы.

На рис. 10а, показано совместное расположение двух БС, осуществляющих радиочастотное покрытие г. Новороссийска с индивидуальными ДН широковещательных каналов управления (для оптимизированной настройки ДН).



Рисунок 10

Размеры ДН приведены в условном масштабе с учетом увеличений K_i , пересчитанных на карту местности для показателя степени затухания на трассах г. Новорossiysка, равного 3. Указанный показатель был выявлен на основе драйв-тестов. На рис. 10б показан вариант расположения минимального числа БС (равно трем), которое способно обеспечить радиочастотное покрытие территории г. Новорossiysка с акваторией порта при использовании дефолтных установок весов, реализующих круговые или полукруговые ДН широковещательных каналов (для штатных вариантов ДН). Рис. 10 наглядно демонстрирует преимущества предложенной методики оптимизации ДН, приводящей к сокращению минимально необходимого числа БС МАКВИЛ от 3 до 2.

Второй пример применения разработанной методики относится к покрытию высотного здания Лахта-центра. Для таких зданий расположение БС на относительно близких расстояниях приводит к тому, что верхние или нижние этажи выходят за пределы главного лепестка ДН вертикального сечения. Это показано на рис. 11 вверху, где красным цветом помечены этажи Лахта-центра, на которых отсутствовало покрытие при расположении обслуживающей БС на удалении 2,5 км. В ситуации расположения обслуживающей БС по адресу: Гаккелевская ул., 21, удаленность от Лахта-центра составила 4,5 км, и все здание попало в главный лепесток вертикальной ДН. Но для штатной антенны со штатной полукруговой азимутальной ДН бюджет радиоканала даже на предельной мощности трансляции не обеспечил проникновение радиосигнала внутрь здания. Эта ситуация показана в нижней части рис. 11.

На рис. 11 показана проблема радиочастотного покрытия для ультраурбанистической застройки на примере Лахта-центра в г. Санкт-Петербург.

В результате применения разработанной методики настройки были получены оптимальные весовые коэффициенты, приведенные в табл. 3 (БС, расположенной на ул. Гаккелевская, 21, обслуживающей здание Лахта-центра). Соответствующая им азимутальная ДН показана на рис. 12. Дополнительное увеличение коэффициента направленности штатной антенны диапазона 340 МГц, достигаемое за счет фокусировки азимутальной ДН, составило $\Delta K_i = 7,95$ дБ. Что против штатной полукруговой ДН привело к увеличению мощности приходящего

сигнала на $7,95 \text{ дБ} - 2,47 \text{ дБ} = 5,48 \text{ дБ}$ и обеспечило проникновение внутрь здания, за исключением лифтовых шахт.

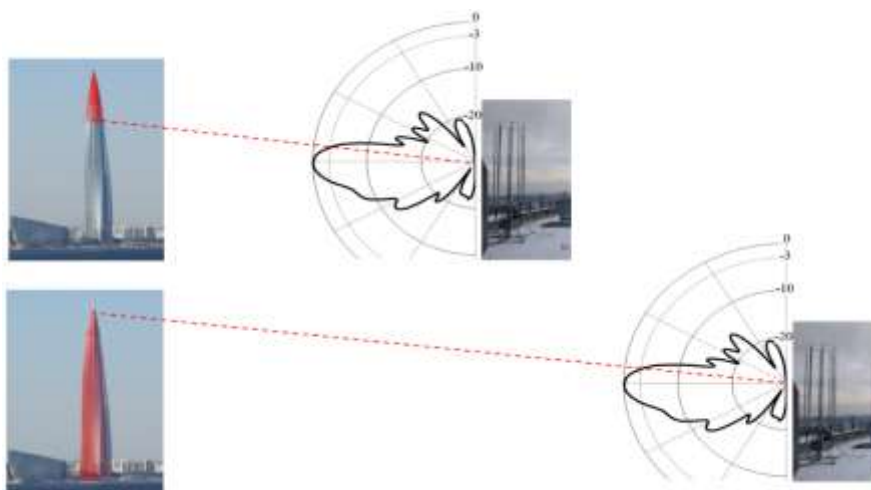


Рисунок 11

Рис. 13 иллюстрирует указанный положительный эффект. Последнее обстоятельство было преодолено уже на этапе развития сети МАКВИЛ путем специально синтезированной для этого антенной системы, показанной на рис. 14. Тем не менее, нужно отметить, что на начальном этапе развертывания сети МАКВИЛ предложенная методика позволила без применения дополнительных БС и специально сконструированных антенн добиться электромагнитного доступа для абонентов практически везде внутри Лахта-центра.

Таблица 3.

$W0 I_i$	$W0 Q_i$
-0,9926	0,1214
-0,9234	0,3838
0,6479	0,7617
0,0477	-0,9989
-0,9926	-0,1214
-0,9234	-0,3838
0,6479	-0,7617
0,0477	0,9989



Рисунок 12



Рисунок 13



Рисунок 14

Заключение

В результате проведенного технического анализа сети МАКВИЛ было установлено, что ключевым показателем успешной организации доступа выступает наличие электромагнитного покрытия территории широковещательными каналами управления. В условиях сложного рельефа местности и/или урбанистической застройки заметное улучшение указанного покрытия можно получить при оптимизации формы диаграмм направленности антенн базовых станций. С этой целью были разработаны: специальная методика, алгоритм и программа машинного обучения для точной настройки весовых коэффициентов, при помощи которых в МАКВИЛ реализуется управление диаграммами направленности широковещательных каналов. Экспериментальная проверка показала, что в ряде случаев разработанный подход позволяет в 1,5-2 раза сократить минимально достаточное для реализации покрытия число БС. Приведены примеры покрытий сетью МАКВИЛ территории г. Новороссийск (с акваторией порта) и здания Лахта-центра в г. Санкт-Петербург, полученные с помощью предложенной методики. Показано, что в каждом случае удастся сократить необходимое число БС.

Литература

1. Аверьянов Р.С., Бокк Г.О., Володина Е.Е., Кудин А.В., Лохвицкий М.С., Пантикян Р.Т., Смирнов А.В., Шорин А.О. Транкинговая система широкополосного доступа МАКВИЛ // Под ред. О.А. Шорина: Монография. – М.: ООО «Издательский дом Медиа Паблишер», 2021. – 196 с.
2. Шорин О.А., Косинов М.И., Каспари Р.Ю., Осин В.В. Рынок корпоративных пользователей и технология широкополосного мобильного доступа MCWILL // Электросвязь, 2017. – № 1. – С. 16-21.
3. Лохвицкий М.С., Сорокин А.С., Шорин О.А. Мобильная связь: стандарты, структуры, алгоритмы, планирование. – М.: Горячая линия – Телеком, 2019. – 264 с.
4. Аджемов С.С., Бокк Г.О., Зайцев А.Г., Миненко П.В., Струев А.В. Модифицированный алгоритм пространственного разрешения источников

- радиоизлучения SDS-MUSIC, работающий при многолучевом распространении сигналов // Радиотехника, 2003. – № 11. – С. 80.
5. Бокк Г.О. Повышение эффективности работы систем связи на основе пространственно-временной обработки и спектрального анализа сигналов/ Диссертация на соискание ученой степени д.т.н.: 05.12.17. – Москва, 2000. – 396 с.
 6. Бокк Г.О. ММО: Оптимизация управления числом логических каналов // Электросвязь, 2017. – № 1. – С. 40-44.
 7. Бокк Г.О. ММО: Оптимизация управления числом логических каналов // В книге: Мобильный бизнес: перспективы развития и реализации систем радиосвязи в России и за рубежом. Сборник материалов (тезисов) XXXVIII международной конференции РАЕН, 2016. – С. 6.
 8. Бокк Г.О. Оптимизация ММО с введением управления числом логических каналов // В сборнике: Мобильный бизнес: перспективы развития и реализации систем радиосвязи в России и за рубежом. Сборник материалов XXX международной конференции РАЕН. Региональное отделение Российской Академии Естественных Наук «Экономика и качество систем связи» и ЗАО «НИРИТ», 2011. – С. 97-109.
 9. Шорин О.А., Бокк Г.О. Аналитическое решение вариационной задачи Шеннона по определению оптимальной структуры сигнала в условиях ограниченной пиковой мощности // Экономика и качество систем связи, 2018. – № 1 (7). – С. 30-39.
 10. Шорин О.А., Бокк Г.О. Численные результаты решения вариационной задачи Шеннона определения оптимальной структуры сигнала в условиях ограниченной пиковой мощности // Экономика и качество систем связи, 2018. – № 1 (7). – С. 39-47.
 11. Шорин О.А., Бокк Г.О. Снижение негативного влияния высоких значений пик-фактора сигналов в системе McWILL // Экономика и качество систем связи, 2019. – № 1 (11). – С. 9-13.
 12. Шорин О.А., Бокк Г.О. Оптимальная структура дискретной QAM-модуляции, обеспечивающая максимум информационной производительности радиоканала // Экономика и качество систем связи, 2018. – № 3 (9). – С. 9-17.
 13. Sesia S., Toufik I., Baker M. LTE – the UMTS Long Term Evolution: From Theory to Practice // John Wiley&Sons, 2011. – p. 752.
 14. Уидроу Б., Стирнз С. Адаптивная обработка сигналов. – М.: Радио и связь, 1989. – 440 с.