

## Архитектура, построение и оборудование Wi-Fi сетей доступа

Васильев В.Г. ", Киев -2023



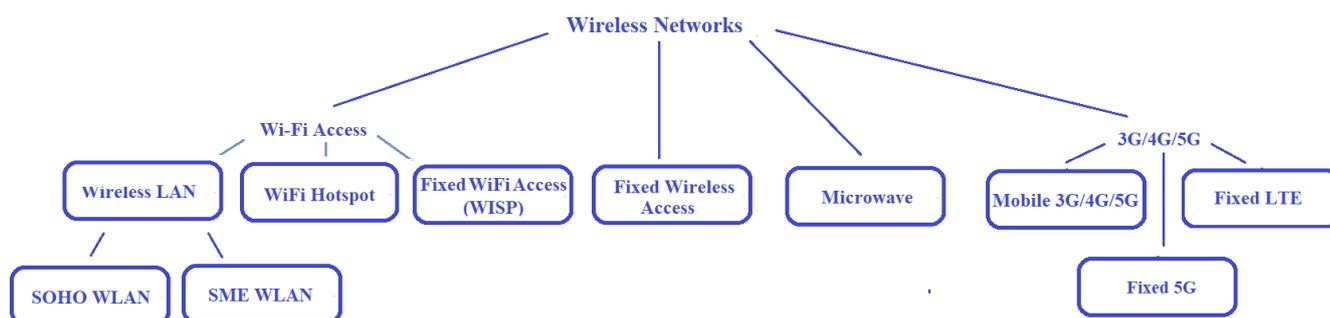
Появление на рынке Wi-Fi устройств нового поколения стандарта 802.11ax (Wi-Fi 6/Wi-Fi 6E) ознаменовало собой начало новой эпохи в развитии беспроводных сетей. Новая технология Wi-Fi доступа технологически принципиально отличается от Wi-Fi предыдущих поколений и обеспечивает:

- мультигигабитные скорости работы Wi-Fi устройств в локальных Wireless LAN сетях за счет использования высоких модуляций до 4096 QAM, ширины частотного канала до 160MHz;
- высокую пропускную способность точек доступа (до 10 Gbps) при обслуживании большого количества клиентских устройств (до 1500 на точку доступа ) за счет применения современных методов доступа OFDMA разделения клиентов по времени и частотным поднесущим каналам (радиотехнология 4G), и пространственного MU-MIMO NxN разделения клиентов по поляризациям (радиотехнология 5G) при множественном (многостанционном) доступе клиентских станций к среде передачи данных;
- высокую дальность и надежность связи при построении на Wi-Fi оборудовании сетей Wide Area Network (WAN) за счет применения современных методов повышения надежности доставки пакетов данных с низкой битовой ошибкой Bit Error Rate (BER);
- работу оборудования Wi-Fi 6E также в новом свободном от помех частотном диапазоне 6 ГГц ( 5950-7125 MHz).

Беспроводные сети подразделяются на:

- сети доступа **Wi-Fi Access** стандарта с 802.11a/b/g/n/ac/ax , работающие в диапазоне частот 2.4, 5 и 6 ГГц;
- сети фиксированного доступа **Fixed Wireless Access (FWA)**, работающие в диапазоне частот 3.5 ГГц, 5 ГГц, а также 60 ГГц;
- радиорелейные каналы связи **Microwave** в диапазоне частот > 7 ГГц;

- сети мобильного и фиксированного доступа Mobile 3G/4G/5G, Fixed LTE , Fixed 5G, работающие в диапазоне частот 600-800 МГц, 2.1, 2.3, 2.6 ГГц, 3.4-3.8 ГГц, 26, 39ГГц и др.



В данной статье мы рассмотрим методы построения, схемы организации связи и оборудование сетей доступа Wi-Fi Access - домашних SOHO и корпоративных SME Wi-Fi сетей (Wireless LAN), а также сетей публичного доступа Wi-Fi Hotspot и сетей фиксированного беспроводного доступа в Интернет – Fixed Wi-Fi Access, также известными как сети провайдеров Wireless Internet Service Provider (WISP). Близкие к сетям WISP по задачам и архитектуре построения сети FWA рассмотрены в разделе “Решения BWA” на сайте [www.unidata.com.ua](http://www.unidata.com.ua).

Оборудование Wi-Fi для сетей доступа WiFi Access стандарта 802.11a/b/g/n/ac/ax работает на частотах 2400-2480 МГц, 4900-6400 МГц, а также недавно для работы оборудования, получившего название Wi-Fi 6E, был выделен диапазон частот 5950-7150 МГц.

### 1. Типы Wi-Fi устройств.

Исходя из решаемых задач и используемой аппаратной платформы устройства доступа делятся на:

- вайфай роутеры (**Wi-Fi Router**) для домашних Home и офисных Small Office сетей (SOHO ) Wireless LAN;
- точки доступа (ТД) **Access Point** для корпоративных сетей Small&Medium Enterprise (SME ), а также для сетей Wi-Fi Hotspot и WISP;
- клиентские Wi-Fi устройства.

Клиентские Wi-Fi устройства имеют Wi-Fi адаптеры и представлены **смартфонами, планшетами, ноутбуками**. Кроме того клиентами Wi-Fi сети может быть самое разнообразное оборудование с Wi-Fi интерфейсами, например, датчики сигнализации, счетчики потребления воды, газа, тепла, электроэнергии и др., получившие название устройств Internet Of Things (IoT).

**Wi-Fi роутеры** (Рис.1) обычно выполнены на бюджетной аппаратной платформе, например, MediaTek (MTK) или Broadcom и функционально предназначены для доступа в Интернет по внешнему каналу (обычно проводному интерфейсу WAN Ethernet) с дальнейшим обеспечением доступа в Интернет по Wi-Fi в локальной сети Wireless LAN (WLAN) небольшому (до 10-15) количеству клиентских Wi-Fi устройств, а также по проводной Ethernet сети LAN в доме, квартире, малом офисе.



Рис.1. Wi-Fi роутер.

Wi-Fi роутер обычно имеет:

- проводной интерфейс- WAN порт Ethernet для подключения к внешнему каналу от провайдера Интернет;
- встроенный 3-5 портовый Ethernet коммутатор (switch) для подключения по кабелю клиентских устройств домашней сети LAN;
- wireless интерфейсы 2.4 и 5 ГГц, а также в устройствах Wi-Fi 6E 6 ГГц для подключения Wi-Fi клиентских устройств домашней сети Wireless LAN (WLAN).

Основной сетевой функцией Wi-Fi роутера является маршрутизация (routing) в виде Network Address Translation (NAT) между WAN и WLAN/LAN интерфейсами. Коммутатор Wi-Fi роутера обычно поддерживает типовые для свича функции – бриджинг с сегментацией сети VLAN, Port Forwarding и др.

Wi-Fi роутеры для подключения WAN порта к каналу Интернет провайдера также часто поддерживают функциональность VPN, туннели L2TP, L2oGRE, PPPoE и др.

Обычно Wi-Fi роутеры оснащены внешними или интегрированными в корпус всенаправленными антеннами с усилением 2-5 dBi и предназначены для использования внутри помещений.

Точки доступа **Access Point**, а также выделяют **AP Enterprise**, обычно выполнены на высокопроизводительной аппаратной платформе, например, Qualcomm-Atheros с радио чипсетом Atheros или Software Defined Radio (SDR) и функционально предназначены для построения корпоративных Wi-Fi сетей, Hotspot сетей публичного доступа в Интернет и сетей фиксированного беспроводного доступа в Интернет Fixed Wi-Fi Access (WISP).

Точка доступа **Access Point** обычно имеет:

- один проводной интерфейс - порт Ethernet с PoE для подключения к проводной LAN. Также точка доступа может быть оснащена дополнительным AUX портом Ethernet;
- wireless интерфейсы 2.4 и 5 ГГц, а также может быть 6 ГГц для подключения Wi-Fi клиентов.

Клиентами Wi-Fi точек доступа могут быть:

- клиентские устройства с Wi-Fi адаптерами - смартфоны, планшеты, ноутбуки, IoT;
- Wi-Fi роутеры, медиа/ТВ приставки с Wi-Fi адаптерами, а также устройства Customer Premise Equipment (CPE) сетей широкополосного беспроводного доступа BWA.

Основной сетевой функцией Wi-Fi точки доступа является бриджинг (bridging) между проводным WAN и Wireless интерфейсами. Точка доступа обычно не имеет Ethernet интерфейсов для подключения проводных клиентов.

Точки доступа могут быть в indoor исполнении для установки внутри помещения (Рис.2) и outdoor для уличного применения (Рис.3). Indoor точки доступа обычно имеют интегрированную всенаправленную антенну с усилением 5-6 dBi. Outdoor точки доступа могут быть оснащены всенаправленной антенной с усилением до 10 dBi и секторной антенной с усилением до 14 dBi.



Рис. 2. Indoor Access Point.

Рис. 3. Outdoor Access Point.

Точки доступа **AP Enterprise** имеют высокую нагрузочную способность, оцениваемую максимальным количеством одновременно обслуживаемых под нагрузкой трафиком клиентов (concurrent clients), не приводящее к деградации суммарной пропускной способности устройства доступа. Этот параметр отличается от associated users –максимальным количеством клиентов, которых можно подключить к устройству доступа.

Для решения задач корпоративных сетей SME, сетей Hotspot и Fixed Wi-Fi Access (WISP) точки доступа **Access Point Enterprise** поддерживают следующие функции:

- обслуживание большого количества 100-200+ (на SDR платформе до 1000+) одновременно работающих клиентов concurrent clients;
- поддержка VLAN 802.1Q;
- Band Steering перевод dual band клиентов с 2.4 ГГц в 5 ГГц;
- защищенную аутентификацию WPA3, WPA2 Enterprise (802.1x/EAP), WPA2 -PSK;
- функциональность Hotspot Captive Portal;
- стандартный 802.11 беспроводный роуминг: Opportunistic Key Caching (OKC) и 802.11r/k/v;
- MESH соединение точек доступа в топологии точка-многоточка;
- питание PoE по стандартам 802.3af/at/bt;
- мониторинг и управление сетью (NMS) на базе облачного Cloud или корпоративного сервера (контроллера).

Таким образом, в Wi-Fi сетях разделяют:

- бюджетные вайфай роутеры, предназначенные для решения задач SOHO в доме, квартире, в малом офисе,

- точки доступа класса AP, в то числе AP Enterprise, предназначенные для решения задач SME в Wi-Fi корпоративных сетях, сетях Hotspot и сетях фиксированного беспроводного доступа Fixed Wi-Fi Access (WISP), имеющие не только более мощную аппаратную платформу, но и соответствующую функциональность.

## 2. Режимы работы устройств Wi-Fi доступа.

Устройства доступа Wi-Fi роутеры и точки доступа AP могут работать в режимах (Operation Mode) **Wireless Router, Access Point, Repeater и WISP**.

### 2.1 Режим Wireless Router.

Данный режим является основным режимом работы Wi-Fi роутера, по которому он и получил свое название как роутер.

На сетевом уровне устройство работает в качестве маршрутизатора (роутера) - NAT трансляции публичного IP адреса с WAN интерфейса в частные IP адреса клиентских устройств в проводной LAN и беспроводной сегменты WLAN сети. (Рис.4).

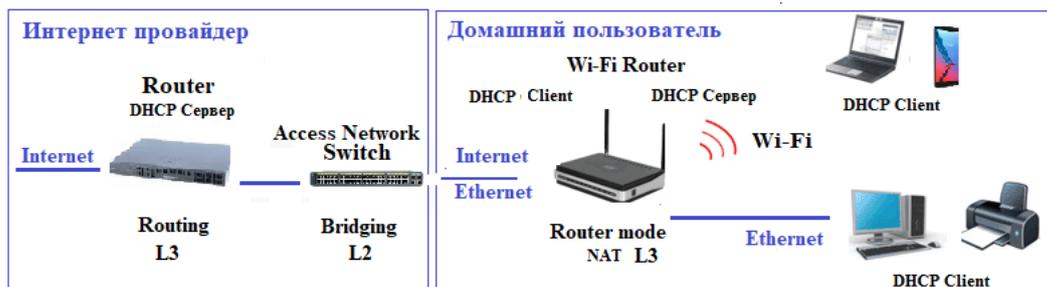


Рис. 4. Работа устройства Wi-Fi доступа в режиме Wireless Router с NAT и DHCP сервером.

В этом режиме Wi-Fi роутер получает публичный IP адрес от провайдера Интернет на свой проводной WAN порт (обычно Ethernet) и раздает через свой встроенный DHCP сервер динамические частные IP адреса своим клиентским устройствам. IP адреса WAN порта и клиентских устройств могут быть не динамическими, а статическими.

На схеме на рис.4 домашний Wi-Fi роутер пользователя подключен в сеть через коммутатор доступа (switch) провайдера в многоквартирном доме и далее имеет выход в Интернет через маршрутизатор провайдера. IP адрес домашний Wi-Fi роутер пользователя получает с DHCP сервера, расположенного на маршрутизаторе провайдера Интернет. Клиенты Wi-Fi роутера в домашней локальной сети LAN и WLAN работают на частных (серых) IP адресах в своей отдельной IP подсети (IP subnet) и имеют выход в Интернет через NAT Wi-Fi роутера.

### 2.2 Режим Access Point.

Данный режим является основным режимом работы (Operation mode) точки доступа Access Point, по которому она и получила свое название. Точки доступа применяются в корпоративных сетях. В данном режиме точка доступа на сетевом уровне работает в режиме bridge (Рис.5).

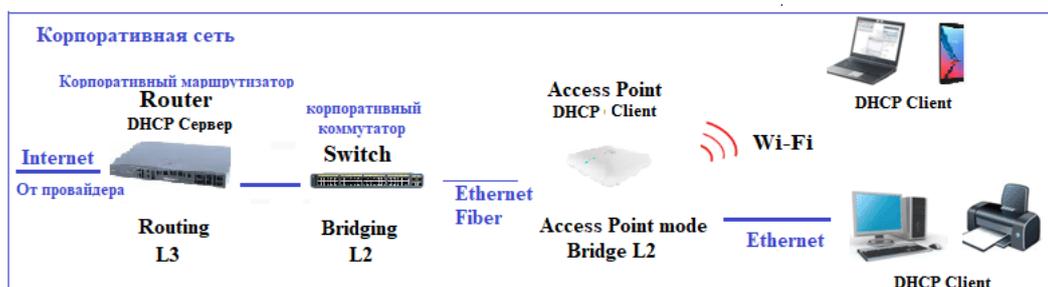


Рис.5. Работа точки доступа в режиме Access Point в bridge.

Данный режим предусматривает наличие в проводной локальной сети LAN отдельного корпоративного маршрутизатора (роутера) с DHCP сервером, который раздает частные IP адреса всем сетевым устройствам корпоративной локальной сети LAN и клиентам ТД в Wireless LAN . При этом IP адреса ТД и клиентских устройств также могут быть статическими.

Спецификой работы сети в данном режиме является работа всех сетевых устройств в одной IP подсети (subnet), к которой принадлежит Ethernet порт внешнего маршрутизатора, к которому подключена локальная сеть с точками доступа. Соответственно все устройства в LAN и WLAN точек доступа в данной IP подсети работают в бриджинге (bridge) на сетевом уровне L2. При этом точки доступа в данной сети выполняют функции беспроводного коммутатора (свича) и IP подсеть может (рекомендуется) сегментироваться по VLAN с целью изоляции сетевых устройств и ограничения их количества в широковещательном (broadcast) домене локальной сети.

### 2.3 Режим Repeater.

Wi-Fi устройство может работать в качестве стационарного Wi-Fi клиента другого устройства Wi-Fi доступа. Такая схема подключения может быть реализована на Wi-Fi роутере, работающем в режиме **Repeater**, также известном как **Wireless Extender, Relay, Client+AP** и т.п.

Режим Repeater обычно применяется для расширения покрытия Wi-Fi роутерами домашней SOHO вайфай сети. Точки доступа Access Point режим Repeater не поддерживают.

В режиме Repeater один из wireless интерфейсов 2.4, 5 ГГц (или если есть 6 ГГц) Wi-Fi роутера подключается как клиент точки доступа (Рис. 6).

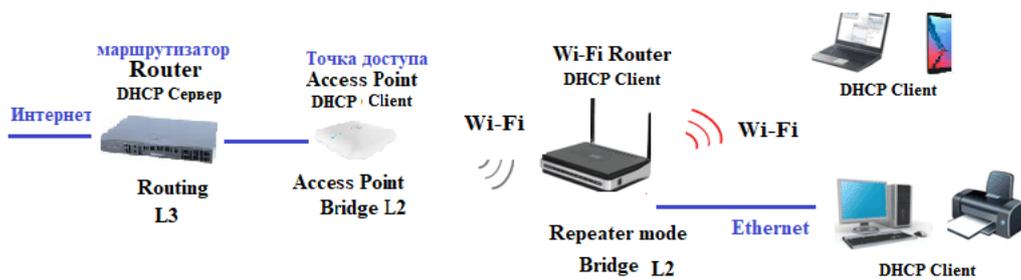


Рис.6 Работа Wi-Fi роутера в режиме Repeater.

При этом на том же wireless интерфейсе, например 5 ГГц, работающем в режиме клиент, создается дополнительный виртуальный 5ГГц wireless интерфейс -virtual SSID, который работает в режиме bridge для подключения по вайфай в 5ГГц локальных Wi-Fi клиентов. Второй свободный wireless интерфейс Wi-Fi роутера, например 2.4 ГГц, также работает в режиме bridge для подключения по вайфай 2.4 ГГц локальных Wi-Fi клиентов.

В данном режиме IP адреса клиентов Wi-Fi роутера в локальных сетях LAN и WLAN, а также IP адрес самого Wi-Fi роутера и точки доступа, к которой подключен Wi-Fi роутер, находятся в одной IP подсети (IP subnet). Тем самым все сетевые устройства в данной схеме работают на сетевом уровне L2 в бриджинге (bridge).

При этом Wi-Fi роутер и всего его клиенты в LAN и WLAN получают динамические IP адреса с DHCP сервера маршрутизатора. IP адрес Wi-Fi роутера может быть только динамическим (назначаться внешним DHCP сервером), а IP адреса клиентских устройств могут быть статическими.

Важной особенностью данной схемы подключения является работа всех клиентов Wi-Fi роутера (репитера) в так называемом режиме **pseudo-bridge**. Клиенты репитера присутствуют в ARP таблице маршрутизатора сети с одним виртуальным (псевдо) MAC адресом. Этот MAC адрес генерируется на основе MAC адреса одного из Ethernet интерфейсов репитера, но с различными присвоенными DHCP сервером клиентам репитера IP адресами. При этом ни маршрутизатор, ни устройство доступа, к которому подключен репитер, не видят в своих ARP таблицах реальные MAC адреса проводных LAN и Wi-Fi клиентов репитера в WLAN. Тем самым, все Wi-Fi клиенты репитера имеют разные IP адреса и один одинаковый псевдо MAC адрес (Рис.7).

	IP Address	MAC Address	Interface
DC	17.1	58:00:BB:0B:77CC	ether1
DC	192.168.88.251	F0:2F:74:E6:11:EC	bridge
DC	192.168.88.252	F0:2F:74:E6:11:EC	bridge
DC	192.168.88.253	F0:2F:74:E6:11:EC	bridge

WAN                      псевдо MAC клиентов репитера

Рис.7 ARP таблица маршрутизатора.

Таким образом, в данной схеме подключения все сетевые устройства работают в бриджинге на сетевом уровне L2 и находятся в одном широковещательном (broadcast) домене.

Данное важное обстоятельство и определяет ограниченное использование этой схемы подключения Wi-Fi роутеров в режиме Repeater к точке доступа Access Point и применяется только для некоторого расширения зон покрытия домашних SOHO вайфай сетей.

#### 2.4 Режим WISP.

Wi-Fi роутер может работать по одному из своих Wi-Fi интерфейсов в качестве Wi-Fi клиента точки доступа Access Point и поддерживать NAT с раздачей IP адресов своим локальным проводным клиентам в LAN и Wi-Fi клиентам в WLAN со своего встроенного DHCP сервера. Такая схема подключения реализована на Wi-Fi роутерах, работающих в режиме WISP, также известном как режим Station.

Данный режим является основным режимом работы (Operation mode) Wi-Fi роутера, подключаемого к ТД сети Fixed Wi-Fi Access провайдера беспроводного доступа в Интернет (Wireless ISP), по которому этот режим и получил свое название как WISP.

В режиме WISP один из wireless интерфейсов 2,4, 5 ГГц (или если есть 6 ГГц) Wi-Fi роутера подключается как клиент точки доступа Outdoor Access Point провайдера Интернет (Рис. 8).

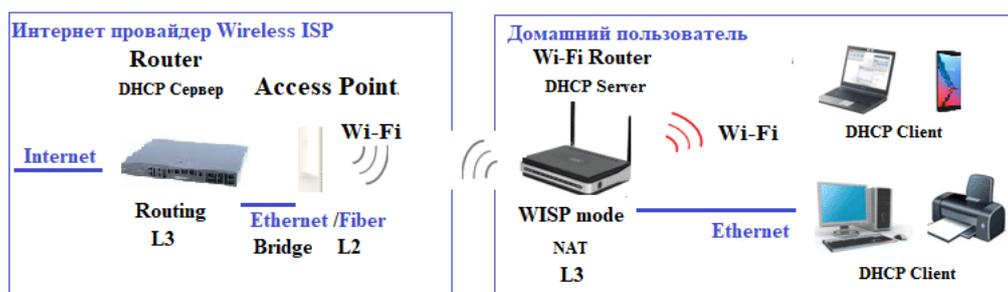


Рис.8 Работа Wi-Fi роутера в режиме WISP.

При этом на том же wireless интерфейсе, например 5 ГГц, работающем в режиме клиент, создается дополнительный виртуальный 5ГГц wireless интерфейс -virtual SSID, который работает для подключения по вайфай в 5ГГц локальных Wi-Fi клиентов. Второй свободный wireless интерфейс Wi-Fi роутера, например 2.4 ГГц, также работает для подключения по Wi-Fi 2.4 ГГц локальных Wi-Fi клиентов.

В данном режиме IP адреса клиентов Wi-Fi роутера в локальных сетях LAN и WLAN, а также IP адреса самого Wi-Fi роутера и точки доступа и внешнего маршрутизатора находятся в разных IP подсетях (IP subnet) между которыми поднят роутинг (NAT).

При этом Wi-Fi роутер получает динамический IP адрес с DHCP сервера маршрутизатора провайдера из его IP подсети. Проводные локальные Ethernet в LAN и Wi-Fi клиенты в WLAN сети Wi-Fi роутера, работающего в режиме WISP, получают IP адрес из локальной IP подсети с локального DHCP сервера Wi-Fi роутера.

На схеме на рис.8 домашний Wi-Fi роутер пользователя подключен в Интернет через один из своих Wi-Fi интерфейсов к Outdoor точке доступа провайдера Fixed Wi-Fi Access . Локальные проводные и Wi-Fi клиенты Wi-Fi роутера в домашней локальной сети работают на частных (серых) IP адресах в своей отдельной IP подсети (IP subnet) и имеют выход в Интернет по WiFi каналу к точке доступа провайдера через NAT своего Wi-Fi роутера.

Все **Wi-Fi роутеры** поддерживают режим работы **Wireless Bridge**, при котором клиенты Wi-Fi роутера работают в отдельной локальной IP подсети через **NAT** с проводного WAN интерфейса Wi-Fi роутера и получают IP адреса с его встроенного DHCP сервера. Поддержка Wi-Fi роутером режима **Access Point**, при котором клиенты работают в одной с Wi-Fi роутером локальной IP подсети в **bridge**, является опциональной. Поддержка Wi-Fi роутером режимов **Repeater** и **WISP** также является опциональной и обеспечивается обычно на более функционально продвинутых устройствах.

Все **Wi-Fi точки доступа** поддерживают режим работы **Access Point**, при котором клиенты и точка доступа работают в одной IP подсети в **bridge**. Более функционально продвинутые точки доступа класса **AP Enterprise** поддерживают также **NAT** с LAN Ethernet интерфейса в WLAN точки доступа с встроенным DHCP сервером. Режимы **Repeater** и **WISP** точки доступа обычно не поддерживают.

### 3. Построение домашних SOHO Wi-Fi сетей.

Домашние вайфай сети класса SOHO рассчитаны на применение в квартирах, домах, небольших офисах для максимально до 10-20 Wi-Fi клиентов. С этой задачей по нагрузке и имеющемуся функционалу успешно справляются бюджетные Wi-Fi роутеры.

Типовая схема подключения домашнего Wi-Fi роутера в Интернет представлена на Рис.9.

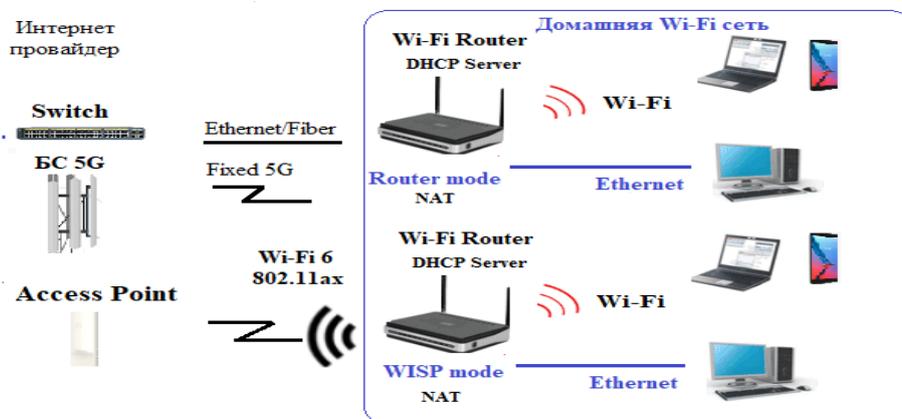


Рис.9 Схема подключения домашнего Wi-Fi роутера в Интернет.

Канал доступа к сетевому оборудованию провайдера Интернет от домашнего Wi-Fi роутера может быть проводным - Ethernet, DSL, PON, Fiber или беспроводным - Wi-Fi, 4G, Fixed 5G.

При проводном или 5G подключении Wi-Fi роутер работает в режиме Wireless Router. При Wi-Fi подключении Wi-Fi роутер работает в режиме WISP. При этом используется Wi-Fi 6 роутер нового поколения стандарта 802.11ax.

Для расширения зоны покрытия (масштабирования) домашней/офисной SOHO сети ставятся несколько вайфай роутеров. При этом вайфай роутеры могут соединяться между собой по кабелю и работать в режиме Access Point (Рис.10) или по Wi-Fi и работать в режиме Repeater (Рис 11) в бриджинге L2.

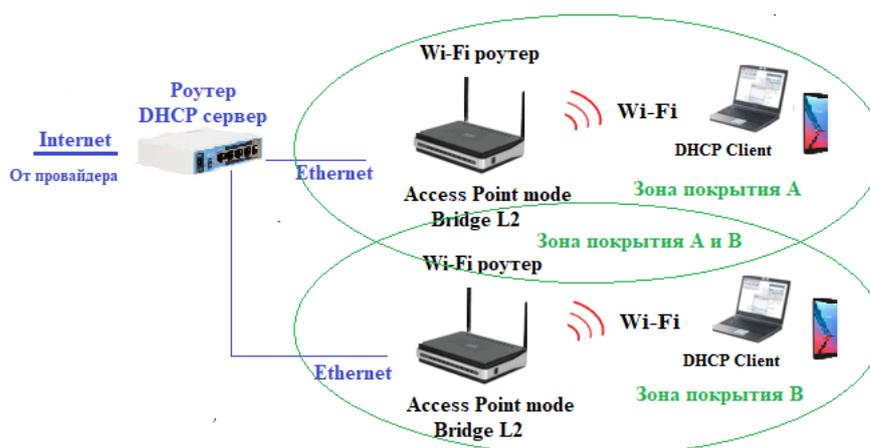


Рис.10 Соединение вайфай роутеров в SOHO сети по кабелю.

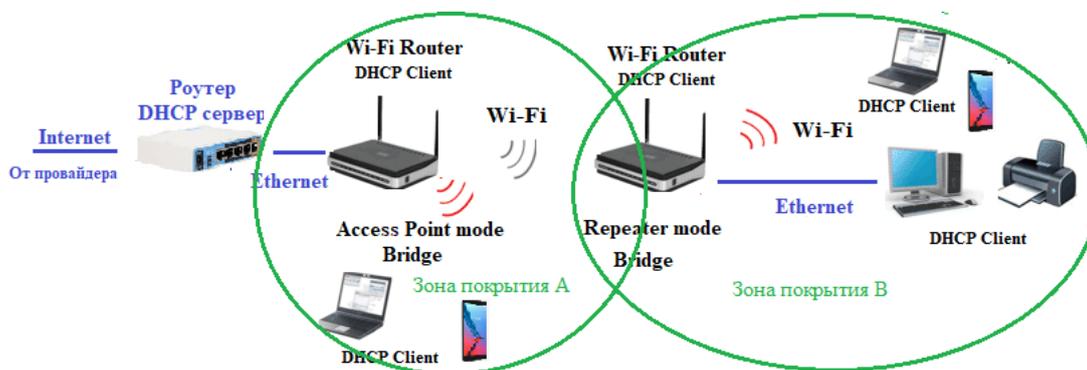


Рис.11 Соединение вайфай роутеров в SOHO сети по Wi-Fi.

При таком соединении Wi-Fi роутеры имеют одинаковый SSID и образуют единую общую сеть Wireless LAN на L1 и L2 сетевом уровне. Соединение сеть по кабелю или по Wi-Fi не может быть реализовано на Wi-Fi роутерах, не поддерживающих режим Access Point или Repeater.

При масштабировании Wi-Fi сети с увеличением количества устройств доступа возникает задача переключения перемещающихся между устройствами доступа клиентов в местах перекрытия зон покрытия, на Рис.10 и 11 это перекрытие зон А и В.

Переключение клиентов между устройствами доступа с разрывом соединения по радио (сетевой уровень L1) с автоматической модификацией MAC адресации на сетевом уровне L2 и без разрыва соединения на сетевом L3 и выше уровнях в общем случае обеспечивается функцией бесшовного роуминга (handover).

Бытует мнение, что бесшовный роуминг необходим для снижения времени переключения клиентов между устройствами доступа с целью обеспечения непрерывной работы пользовательских приложений, например, голосовой или видео связи. Это не совсем так, на самом деле все же основной функцией бесшовного роуминга является обеспечение масштабирования Wi-Fi сети.

Различают два типа стандартизованного бесшовного роуминга. Это **Opportunistic Key Caching (ОКС)**, который поддерживается практически всеми, в том числе бюджетными, клиентскими устройствами, и 802.11r/k/v, который на сегодняшний день поддерживается смартфонами продвинутого премиального сегмента. Роуминг 802.11r/k/v обеспечивает переключение подвижных клиентов с оптимальным выбором точек доступа исходя из мощности радиосигналов, загрузки (load balancing) точек клиентами, трафиком и др.

Стандарт 802.11r при смене устройством точки доступа использует функцию FT (Fast Basic Service Set Transition – быстрая передача базового набора служб) для ускорения аутентификации. Функция FT работает с двумя методами аутентификации: PSK (Preshared Key - общий ключ) и 802.1X.

Стандарт 802.11k помогает устройствам быстро находить ближайшие точки доступа путем создания списка доступных для перехода частотных каналов. При снижении уровня сигнала от текущей точки доступа ниже порогового уровня, устройство будет искать доступные для перехода точки доступа из данного списка.

Сообщения стандарта 802.11v предоставляют информации клиентскому устройству о загруженности клиентами и трафиком доступных для перехода точек доступа. Устройство при роуминге учитывает эту информацию при принятии решений о выборе для перехода точки доступа.

Бюджетные домашние Wi-Fi роутеры, как правило, не поддерживают бесшовный роуминг ни ОКС, ни тем более 802.11r/k/v, что не позволяет клиентам эффективно переключаться между Wi-Fi роутерами. Именно данное обстоятельство является главной причиной ограниченных возможностей масштабирования сети на базе Wi-Fi роутеров.

При отсутствии поддержки у устройств доступа бесшовного роуминга клиент при своем перемещении держит соединение со своим устройством доступа вплоть до границы его зоны покрытия и не переключается на другое устройство доступа с более мощным радиосигналом. При этом клиент на границе зоны покрытия имеет слабый радиосигнал, низкую рабочую модуляцию и низкую скорость доступа, хотя имеет в месте перекрытия зон обслуживания (покрытия) возможность переключения на другое устройств доступа и, соответственно, получения более высокой скорости доступа.

Для решения этой проблемы на некоторых устройствах Wi-Fi доступа, не имеющих поддержки бесшовного роуминга, применяется принудительный дисконект клиента от устройства доступа при снижении мощности сигнала от клиента (Uplink RSSI) ниже заданного порога. При этом клиент после дисконекта подключается уже к другому устройству доступа с более мощным сигналом и более высокой скоростью доступа. Этот способ переключения клиента между устройствами доступа известен как псевдо-роуминг.

Такой способ роуминга в виде псевдо-роуминга имеет ряд существенных недостатков.

При подключении клиента после принудительного дисконекта к новому устройству доступа:

- клиент вынужден заново проходить процедуру аутентификации и авторизации в сети, повторно редиректиться на стартовую страницу Splash Page в сети Hotspot и др;
- время поиска клиентом для подключения к новому устройству доступа может занимать до 1-5 сек, что часто приводит к потере сессий работы клиентских приложений на сетевых уровнях L4 и выше;
- клиент по новому получает от DHCP сервера свой IP адрес (возможно, тот же самый) с потерей соединения TCP соединения на сетевом уровне L3/L4;
- при постоянном обновлении клиентами IP адресов по DHCP с обращением Broadcast Discovery к DHCP серверу и Broadcast Offer ответах DHCP сервера при большом количестве перемещающихся клиентов приводит к ширококвещательному Broadcast шторму и деградации пропускной способности вайфай сети;
- при плотном размещении большого количества устройств доступа с реализацией псевдо- роуминга в сети с перекрытием зон обслуживания (когда в одной локации перекрываются три и больше зон) клиенты, даже находясь без движения на одном месте в зонах перекрытия, из- за флуктуаций радиосигнала (обычно +/- 5 dB) постоянно дисконектятся и переподключаются между разными устройствами доступа с перерывами связи продолжительностью до 1-5 секунд;
- отсутствие балансировки нагрузки клиентами устройств доступа при большом количестве клиентов в сети приводит к перегрузке устройств доступа и падению их пропускной способности.

Некоторые из перечисленных выше проблем являются не критичными для работы домашних сетей и SOHO сетей для малых офисов с небольшим количеством обслуживаемых клиентов, а некоторые решаются разными нестандартными и кустарными способами при наличии определенных ограничений.

Например, распространено ошибочное мнение, что решение Wi-Fi на MikroTik поддерживает роуминг. На самом деле Микротик поддерживает псевдо-роуминг с принудительным дисконектом клиентов по уровню сигнала. При этом для решения наиболее критичной проблемы -необходимости повторной аутентификации клиента при его переключении между устройствами доступа Микротик используется контроллер CAPsMAN. Контроллер запоминает MAC адреса клиентов сети и при повторном подключении клиентов в сеть при смене устройства доступа блокирует их повторную аутентификацию. Данное решение имеет ограниченное применение и работает только при MAC аутентификации клиентов в сети. В частности, это не работает при защищенном доступе 802.1x, где MAC клиентов зашифрованы.

Тем самым, объединение нескольких вайфай роутеров в единую сеть без поддержки бесшовного роуминга, но с реализацией псевдо-роуминга, работает при небольшом количестве (два-три) вайфай роутера в сети с низкой плотностью их размещения и слабым перекрытием их зон обслуживания. Дальнейшее увеличение количества вайфай роутеров в сети приводят к продолжительным перерывам в связи клиентов и деградации пропускной способности вайфай роутеров и сети в целом.

Большинство бюджетных вайфай роутеров не поддерживают даже псевдо-роуминг, поскольку не имеют функционал задания порогового уровня сигнала для принудительного дисконекта клиента. Тем самым на таких устройствах невозможна реализация переключения клиента между устройствами доступа и, соответственно, задача масштабирования сети на таких вайфай роутерах принципиально не имеет своего решения.

#### **4. Построение корпоративных Wi-Fi сетей.**

Корпоративные вайфай сети рассчитаны на применение на предприятиях Small & Medium Enterprise для обслуживания большого 50-100+ количества клиентов.

В самом простом случае в корпоративной сети устанавливается одна точка доступа AP Enterprise, которая может работать в режиме Wireless Router или режиме Access Point.

Смысл применения точки доступа AP Enterprise в режиме Wireless Router вместо использования бюджетного вайфай роутера в том же режиме Wireless Router заключается исключительно в получении возможности обслуживания большого количества клиентов в Wi-Fi корпоративной сети, поскольку максимальная нагрузочная способность типичного вайфай роутера обычно не превышает 15-20 клиентов, а масштабирование корпоративной сети путем увеличения количества применяемых в сети вайфай роутеров имеет рассмотренные выше ограничения.

В режиме Access Point точка доступа работает в режиме бриджинга и подключается в Интернет через корпоративный маршрутизатор (проводной роутер), работающий в NAT.

Корпоративная сеть на точках доступа AP Enterprise, работающих в режиме Access Point в бриджинге может масштабироваться путем увеличения используемых точек доступа для расширения покрытия и увеличения общего количества обслуживаемых клиентов.

На рис.12 представлена универсальная схема построения корпоративной сети на точках доступа AP Enterprise.

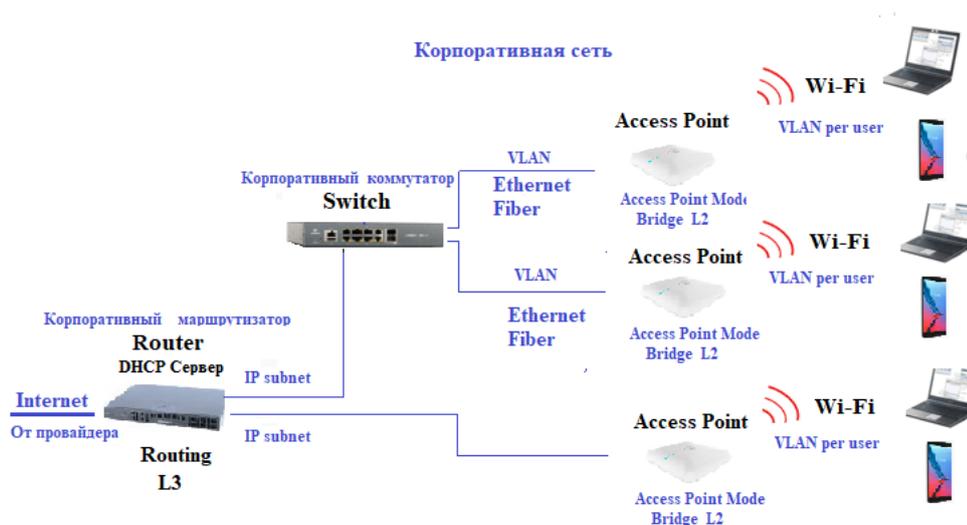


Рис.12 Схема построения корпоративной Wi-Fi сети.

Точки доступа рекомендуется подключать в разных VLAN к Ethernet портам управляемого коммутатора (свича) L2/L3, а также в разных IP подсетях (subnet) корпоративного маршрутизатора. Питание на точки доступа можно подавать через Ethernet порты PoE out коммутатора. При большом количестве клиентов на точку доступа или в целом в сети (>100-200) рекомендуется применение подключения клиентов к точкам доступа в режиме VLAN per client.

Подключение клиентов к точкам доступа при их перемещении в сети обеспечивается функционалом бесшовного роуминга Opportunistic Key Caching (ОКК), что обязательно к применению для поддержки роуминга любых Wi-Fi клиентов и 802.11r/k/v - опционально для поддержки роуминга продвинутых Wi-Fi клиентов.

Роуминг может работать без использования в сети контроллера доступа, например на точках доступа AP Cambium Networks.

При реализации функций бесшовного роуминга в корпоративной L2 сети точки доступа, например, cnPilot Access Point Enterprise E410 (802.11ac wave2) или AP Enterprise XV2-2 Wi-Fi 6 (802.11ax) Cambium Networks, обмениваются роуминговыми broadcast сообщениями с информацией о клиентах сети. Для прохождения broadcast сообщений между различными VLAN на коммутаторе поднят роутинг L3 между VLAN. В случае нахождения точек доступа в различных IP подсетях ( subnet) роуминг между IP сетями поддерживается бесплатной облачной или корпоративной системой управления Network Management System (NMS) cnMaestro Cambium Networks.

Перемещающийся по сети клиент при достижении на точке доступа порогового уровня SNR (отношение сигнал/ шум, - дефолтное значение обычно 15 dB) не дисконектится от точки доступа, как это происходит при псевдо-роуминге, а находясь в области перекрытия зон обслуживания по информации, получаемой от точек доступа, выбирает подходящую для переключения новую точку доступа по роумингу ОКК или 802.11r/k/v, После выбора клиентом подходящей точки доступа происходит дисконект клиента от точки доступа на физическом (L1 радио) уровне сети и устанавливается

соединение по радио Wi-Fi (L1) с новой точкой доступа с обновлением всех ARP таблиц на сетевом уровне L2.

Если клиент при своем перемещении не слышит другие точки доступа (не попадает в зоны обслуживания других точек доступа), то, несмотря на достижение порогового для роумингового переключения клиента уровня SNR, точка доступа держит соединение с клиентом вплоть до выхода клиента из ее зоны покрытия (обслуживания).

В реализации бесшовного роуминга при смене точки доступа клиент:

- не проходит на новой точке доступа полную процедуру повторной аутентификации, в том числе защищенной 802.1x;
- не обновляет свой IP адрес с центрального DHCP сервера сети;
- не перенаправляется на стартовую страницу Captive Portal на внешнем web- сервере или облачном сервисе;
- соединение на сетевом и транспортном уровнях L3, а также сессии работы приложений на уровнях L4+ при смене клиентом точки доступа не прерываются.

Время переключения в зависимости от типа применяемого роуминга составляет на 802.11g до 20 мс, ОКС- до 150 мс.

Все точки доступа и коммутатор сети централизованно мониторятся и управляются с облачного или корпоративного NMS.

На рис.13 представлен скрин с аккаунта облачной системы управления NMS cnMaestro Cambium Networks корпоративной Wi-Fi сетью.

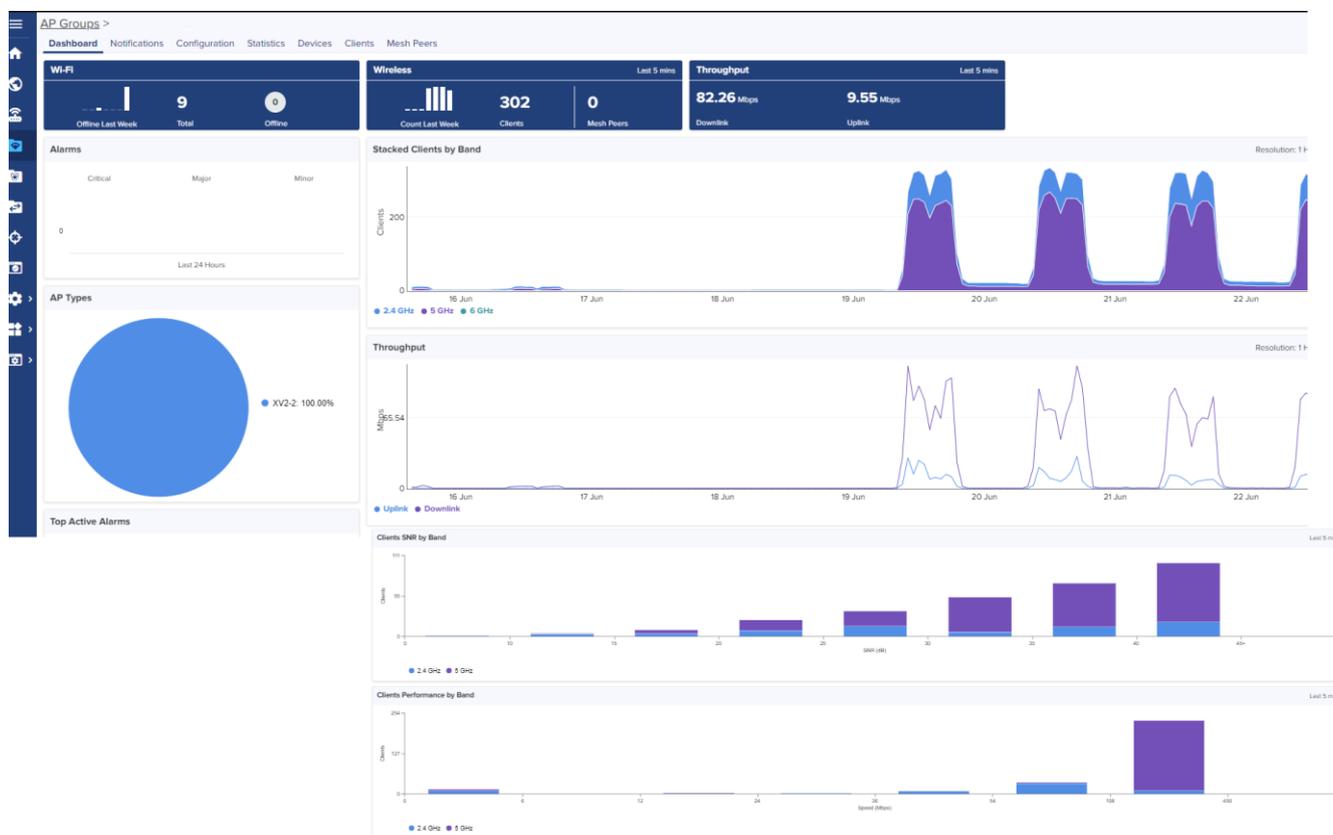


Рис.13 NMS cnMaestro Cambium Networks корпоративной сети.

В корпоративной сети установлено порядка 10 точек доступа XV2-2 WiFi 6 Access Point, с подключением к коммутаторам и маршрутизатору по схеме на рис.12. В сети обслуживаются порядка 400+ корпоративных пользователей, оснащенных ноутбуками, планшетами и смартфонами. Wireless LAN и LAN сети отделов организации, например бухгалтерия, маркетинг, ИТ, гостевая сеть и др. разделены по IP подсетям и маршрутизируются на центральном корпоративном маршрутизаторе. Сети с точками доступа внутри отделов разделены по VLAN виртуальным сетям, коммутируемым на управляемых L2/L3 свичах.

Все клиенты корпоративной сети работают в беспроводном роуминге ОКС, 802.11r/k/v.

Зоны покрытия точек доступа в данной корпоративной сети обеспечивают большинству клиентских устройств работу на высоком по мощности сигнале (SNR >30—40 dB) на максимальных модуляциях (data rate) и высоких скоростях передачи данных.

### 5. Построение Wi-Fi сетей публичного доступа Hotspot.

Сети Hotspot предназначены для оказания сервиса публичного вайфай доступа в Интернет для пользователей в кафе, ресторанах, торговых центрах (Indoor Hotspot), а также на улицах, площадях, парках, пляжах, вокзалах, и других публичных местах (Outdoor Hotspot).

Схема построения сети Hotspot аналогична построению корпоративной Wi-Fi сети на точках доступа AP Enterprise. Спецификой сети Hotspot является редирект клиента при первом вхождении в сеть на стартовую html страницу Splash Page сервиса, выполняющую обычно информационную или рекламную функцию, размещаемую на внешнем web сервере или облачном сервисе, например cnMaestro Cambium Networks. Редирект клиентов при подключении клиентов в сеть при использовании оборудования Cambium Networks реализуется непосредственно на точках доступа.

В сетях Outdoor Hotspot, например, на оборудовании Cambium Networks, применяются точки доступа **Outdoor XV2-2T0 Wi-Fi 6 AP Enterprise** с всенаправленной антенной или **Outdoor XV2-2T1 Wi-Fi 6 AP Enterprise** с секторной антенной, которые устанавливаются на высоте 6-12 метров на стенах домов, на опорах освещения, мачтах провайдера сервиса Outdoor Hotspot. Клиентами такой сети являются клиенты со смартфонами, планшетами, ноутбуками.

На рис. 14 представлена схема организации сети Outdoor Hotspot на базе точки доступа Outdoor XV2-2T0 Wi-Fi 6 AP Enterprise, установленной на опоре (мачте) провайдера услуги.



Рис.14 Схема организации сети Outdoor Hotspot.

Точка доступа XV2-2T0 имеет специальный для Outdoor AP дизайн всенаправленной антенны с усилением 9 dBi в 5 GHz и 5 dBi 2.4 GHz с большим углом диаграммы направленности (ДН) по углу места и отсутствием провалов (null) в ДН антенны (Рис.15). Это обеспечивает высокие уровни сигналов и высокую скорость доступа ближних и дальних клиентов.



Рис.15 Диаграмма направленности антенны точки доступа Outdoor Wi-Fi 6 XV2-2T0.

На Рис. 16 представлена зависимость Download скорости доступа на смартфон Samsung Galaxy S10E в зависимости от дальности в условиях прямой видимости LOS до точки доступа Outdoor XV2-2T0 Wi-Fi 6 AP Enterprise производства Cambium Networks.

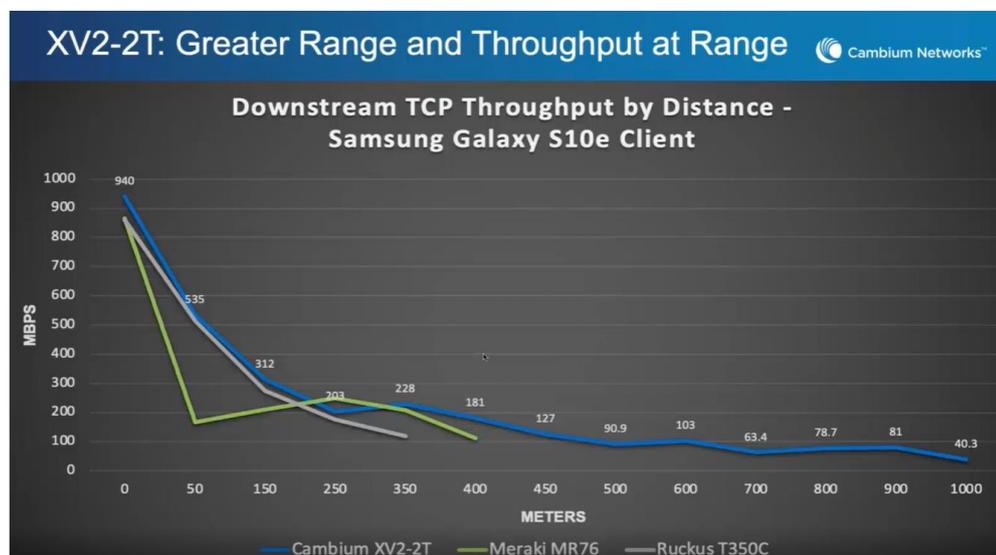


Рис.16. Скорость доступа (TCP download) клиента (смартфон с Wi-Fi6/802.11ax) в зависимости от дальности LOS до точки доступа Outdoor XV2-2T0 AP.

На Рис. 17 представлена расчетная план-схема покрытия в диапазоне частот 5GHz/2.4GHz сети Wi-Fi Hotspot публичного доступа в Интернет курортного поселка на базе Outdoor точек доступа XV2-

2T0 Wi-Fi 6 производства Cambium Networks. Расчет покрытия выполнен с помощью утилиты Wi-Fi Designer Cambium Networks.



Рис. 17 План покрытия сети Wi-Fi Hotspot доступа в Интернет курортного поселка.

По плану для покрытия сервисом доступа в Интернет поселка Outdoor точки доступа устанавливаются на стенах зданий, опорах освещения, мачтах провайдера каждые 300-600 метров на открытой местности (условия LOS) и каждые 200-300 метров в условиях многоэтажной застройки и частного сектора (условия NearLOS/LOS).

По расчетному плану во всех локациях поселка обеспечивается радиосигнал Downlink RSSI не менее  $-65-70$  dBm, что обеспечивает по всему поселку скорость доступа в Интернет пользователям со смартфоном порядка 50-100 Mbps в условиях NLOS и до 300-700 Mbps в LOS на открытой местности, например, на пляже. По всему поселку для клиентов сети поддерживается бесшовный Wi-Fi роуминг.

На рис. 18 представлен скрин корпоративной on Premise системы управления NMS cnMaestro Cambium Networks городской сети Wi-Fi Hotspot в одном из областных центров Украины.

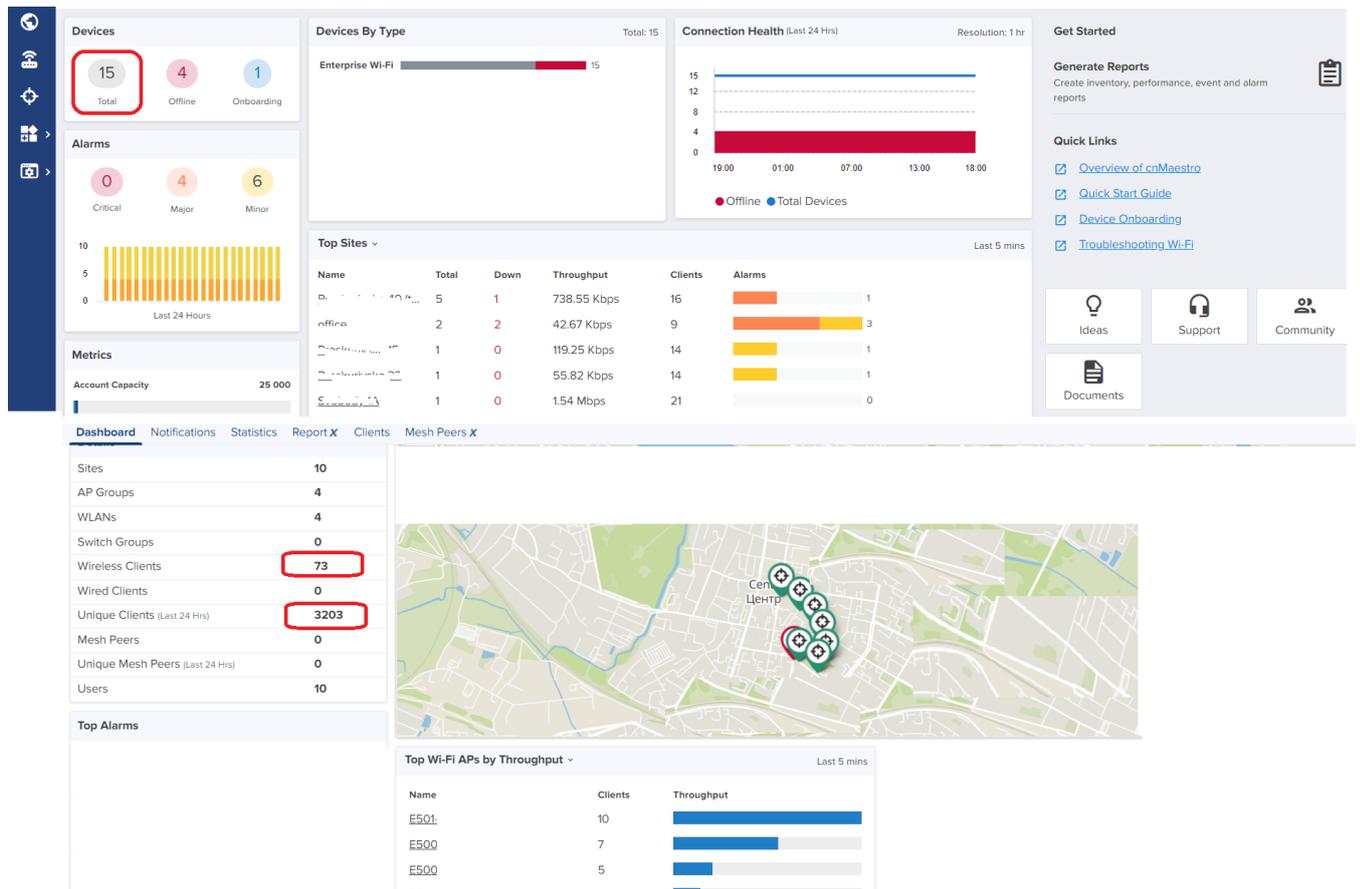


Рис.18 Корпоративная система управления **NMS cnMaestro Cambium Networks** городской сети **Wi-Fi Hotspot**.

В сети установлены 15 точек доступа Outdoor E500/501S/502S Access Point Enterprise в центре города (центральная пешеходная улица и прилегающий парк) и др. локациях - ВДНХ, рынок и др. Данная сеть принадлежит провайдеру Интернет и предоставляет бесплатный без регистрации Wi-Fi доступ в Интернет для горожан и гостей города.

Точки доступа подключены в сеть по схеме организации связи, представленной на рис.12. Между клиентами сети поддерживается роуминг ОКС, 802.11r/k/v.

За одни сутки к сети в зависимости от дня недели подключается порядка 3-5 тыс. уникальных пользователей. Монетизация услуги Wi-Fi доступа осуществляется через размещаемую в сети рекламу .

#### 6. Построение Wi-Fi сетей фиксированного доступа Fixed Wi-Fi Access.

Сети фиксированного доступа Fixed Wi-Fi Access, также известные как сети WISP, предназначены для фиксированного доступа стационарных Wi-Fi клиентских станций, а также устройств Интернет вещей Internet Of Things (IoT), оснащенных адаптерами Wi-Fi 6 (802.11ax).

Базовыми станциями сети **Fixed Wi-Fi Access** являются точки доступа **Outdoor Access Point** новейшего стандарта **Wi-Fi 6 (802.11ax)**, например **Outdoor XV2-2T Wi-Fi 6 AP Enterprise Cambium Networks**, устанавливаемые на крышах многоэтажных домов, на столбах освещения, опорах ЛЭП, вышках, мачтах мобильной связи и беспроводных провайдеров Интернет WISP.

Клиентами такой сети являются стационарные домашние indoor и outdoor Wi-Fi 6 (802.11ax) роутеры, устанавливаемые в квартирах (indoor) многоквартирных домов городов, на домах (outdoor) частного сектора пригородов и поселков, устройства IoT на промышленных и других объектах.

На рис.19 представлена схема организации связи домовой сети **Fixed Wi-Fi Access (WISP)** в многоквартирном доме или Жилищном Комплексе (ЖК), обеспечивающей доступ в Интернет пользователей через установленные в квартирах домашние Wi-Fi роутеры, подключенные по Wi-Fi к уличным точкам доступа сети провайдера **Fixed Wi-Fi Access**.

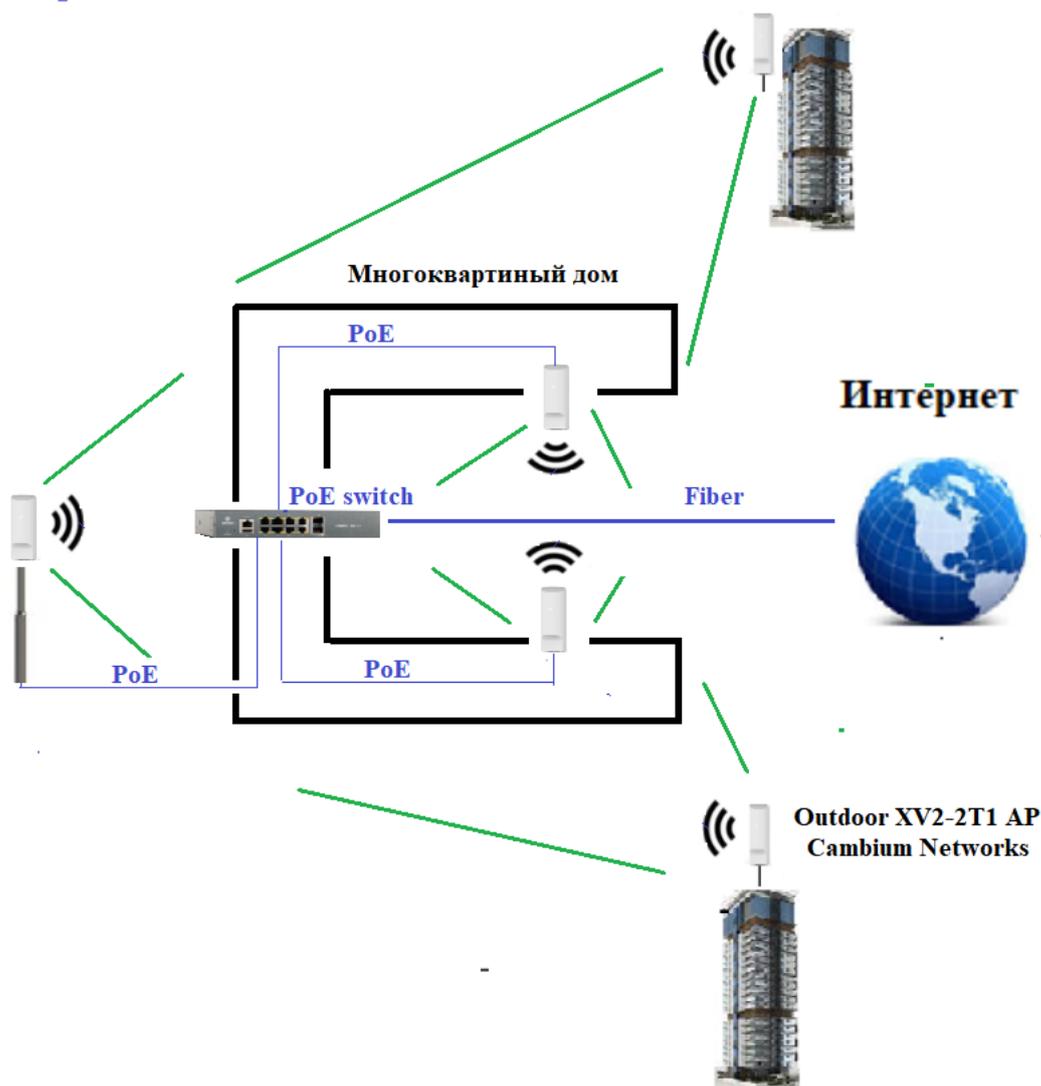


Рис.19 Схема организации связи сети Fixed Wi-Fi Access (WISP) многоквартирного дома.

Outdoor точки доступа в такой сети установлены на крыше дома, крышах соседних домов и столбах освещения и подают WiFi сигнал непосредственно в квартиры ЖК. Рекомендуемое расстояние от уличных точек доступа до обслуживаемого сервисом вайфай доступа домов – до 100 метров. Это обеспечивает покрытие услугой вайфай доступа квартир в многоквартирном доме (ЖК) с сигналом мощностью Downlink RSSI порядка -55-65 dBm. Это позволяет работать вайфай роутерам на максимальной модуляции (data rate) на максимальной реальной скорости до 600 Mbps в канале 80МГц и 1+Gbps в канале 160МГц.

Точки доступа подключены в сеть через управляемый свич по PoE. Свич подключен к маршрутизатору с внешним каналом в Интернет по оптике.

Wi-Fi 6 (802.11ax) роутеры в квартирах подключаются к точкам доступа сети Fixed Wi-Fi Access (WISP) провайдера и далее в Интернет через свой 5 ГГц интерфейс Wi-Fi 6 (802.11ax) в режиме WISP. Клиентский Wi-Fi роутер устанавливается в квартире недалеко от окна в месте с наиболее высоким Wi-Fi сигналом от сети Fixed Wi-Fi Access.



Это проводится аналогично тому, как выбирается место для установки комнатной ТВ антенны для подключения к телевизионной станции аналогового или цифрового DVB-T2 эфирного ТВ вещания. При подключении применяется индивидуальный для каждого клиентского вайфай роутера пароль беспроводной сети - ключ безопасности WPA2-PSK (технология ePSK Cambium Networks) и выделенный VLAN per client. Это обеспечивает безопасность подключения клиентов и изоляцию их локальных сетей

Подключение пользователя в квартире в сеть Интернет максимально простое. Пользователь приобретает рекомендованный вайфай роутер в торговой сети или у провайдера, загружает в роутер полученную от провайдера конфигурацию устройства, устанавливает роутер в подходящем месте в квартире и включает роутер в розетку питания 220В. Вайфай роутер самостоятельно находит и подключается к точке доступа провайдера и получает канал в Интернет. Пользователь может самостоятельно задать SSID и ключ доступа для своей локальной вайфай сети для подключения сеть домашних пользователей.

Такие сети обеспечивают подключение вайфай роутеров в квартирах в сеть провайдера Интернет на скорости 50 Mbps - 1+ Gbps, что является простой и эффективной альтернативой подключению в Интернет по кабелю.

На точках доступа данной сети на отдельном SSID может также работать сеть **Wi-Fi Hotspot**, обеспечивающая Wi-Fi доступ в Интернет непосредственно со смартфонов/планшетов/ноутбуков пользователей, находящихся на территории, в общедомовых помещениях и в квартирах многоквартирного дома (ЖК).

На рис. 20 представлен скрин облачного аккаунта NMS cnMaestro Cambium Networks домовой сети **Fixed Wi-Fi/ Wi-Fi Hotspot** многоквартирного дома.

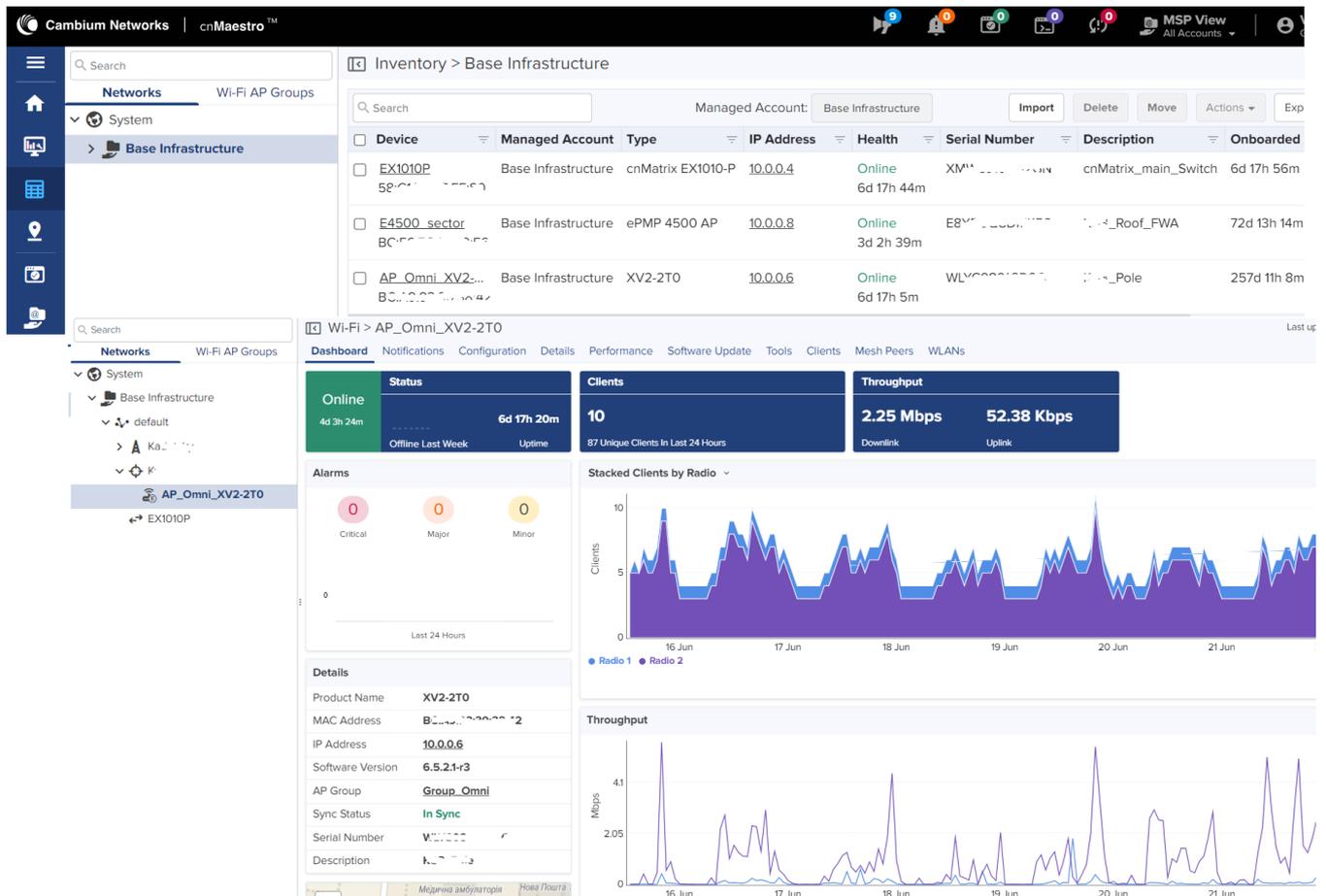


Рис.20. Облачная NMS cnMaestro Cambium Networks домашней сети **Fixed Wi-Fi/ Wi-Fi Hotspot** многоквартирного дома.

Многоквартирный дом (350 квартир) обслуживается двумя точками доступа Outdoor XV2-2T Wi-Fi6 Access Point Enterprise по схеме организации связи корпоративной сети на рис. 12. Каждая точка доступа имеет по 3 виртуальных Wireless LAN интерфейса (SSID). К одному SSID в 5ГГц подключаются стационарные клиенты- Wi-Fi роутеры в квартирах, ко второму SSID в 5ГГц подключаются клиенты смартфоны, планшеты и ноутбуки пользователей, находящихся в квартирах и на придомовой территории. Третий SSID в 2.4 ГГц обслуживает IoT устройства.

В данной сети предоставляются сервисы фиксированного (Fixed WiFi Access/WISP) и подвижного (WiFi Hotspot) доступа в Интернет, а также IoT - Система Контроля и Управления Доступа (СКУД), система домофонии и охранной сигнализации.

**СКУД и домофония** обеспечивают контроль входа в подъезды, общедомовые помещения, на территорию ЖК путем управления замками дверей, калиток, шлагбаумами, лифтами, в том числе дистанционно через сеть Wi-Fi и Интернет со смартфона и/или видеомонитора домофона в квартире и служб охраны.

**Охранная сигнализация** обеспечивает охрану квартир, общедомовых помещений, припаркованных на придомовой территории автомобилей, путем установки беспроводных датчиков охраны с получением сигнала тревоги звонком, SMS, push уведомлением на мобильные телефоны пользователей системы и служб охраны дома.

Зарегистрированные в биллинговой системе, в частности в данной сети используется Abills, стационарные клиенты сети Fixed Wi-Fi Access (WISP) – вайфай роутеры в квартирах постоянно подключены в Wi-Fi сеть и обслуживаются на скорости доступа по своему Тарифному Плану (ТП). Домашние клиенты в квартирах подключаются в сеть провайдера через свой домашний Wi-Fi роутер на скорости доступа согласно ТП подключенного в сеть своего вайфай роутера.

Зарегистрированные в сети клиенты при подключении в сеть Wi-Fi Hotspot имеют доступ согласно своему ТП. Незарегистрированные клиенты при подключении в сеть редиректятся на стартовую страницу Splash Page сервиса Wi-Fi Hotspot.

На рис. 21 представлена стартовая страница Splash Page, на которую редиректится незарегистрированный клиент при подключении к сети **Wi-Fi Hotspot**.

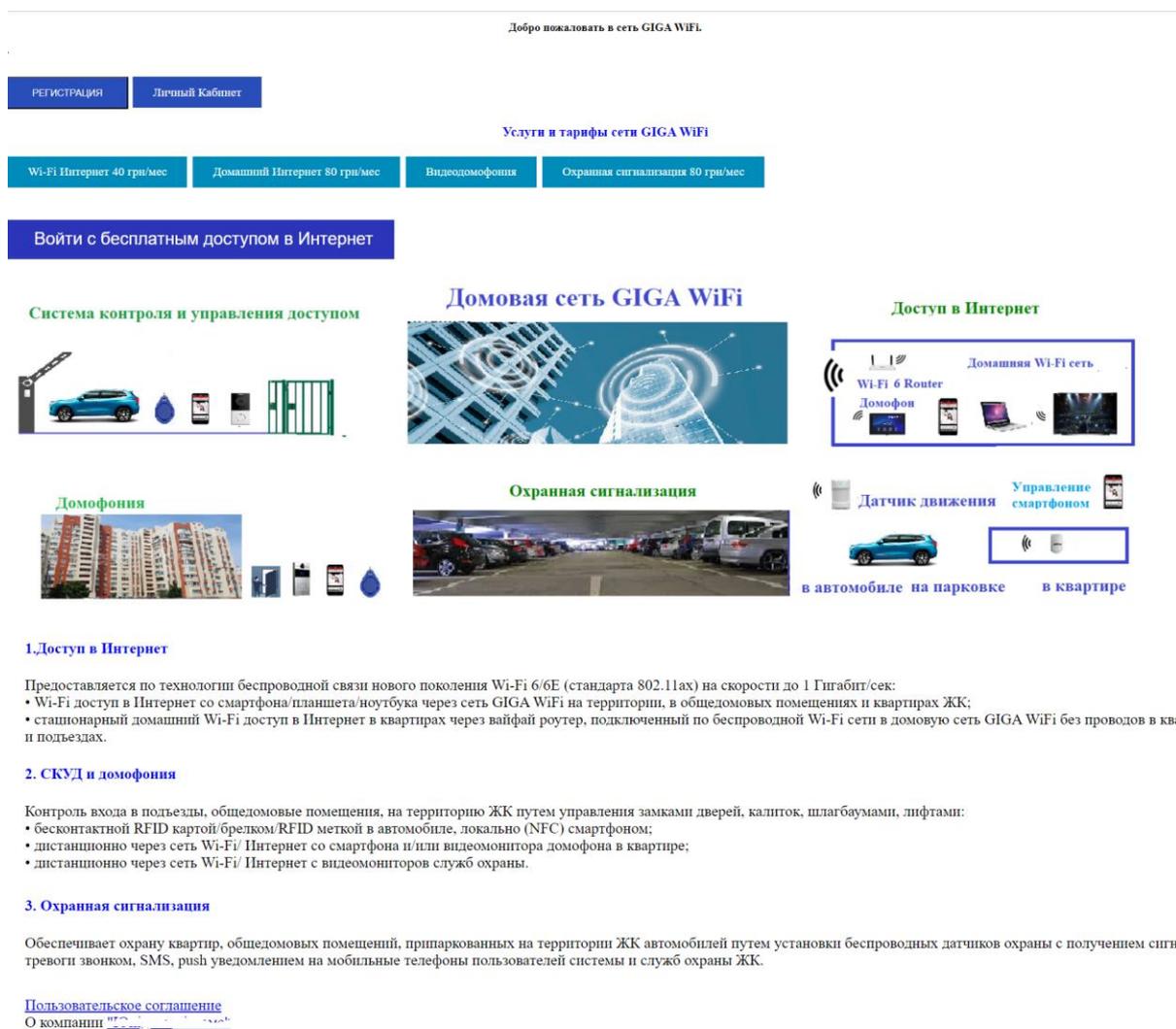


Рис. 21 Стартовая страница Splash Page сети Fixed Wi-Fi Access/ Wi-Fi Hotspot.

На данной странице пользователи могут ознакомиться с перечнем услуг сети, условиями и порядком подключения в сеть, зарегистрироваться в сети, а также получить бесплатный гостевой доступ в Интернет.

На крыше данного дома также установлена базовая станция Fixed Wireless Access ePMP 4500, раздающая гигабитные каналы связи в мультипойнт на соседние многоквартирные дома.

На Рис.22 представлена схема организации связи сети **Fixed Wi-Fi Access** беспроводного доступа в Интернет в частном секторе в пригороде и поселке.

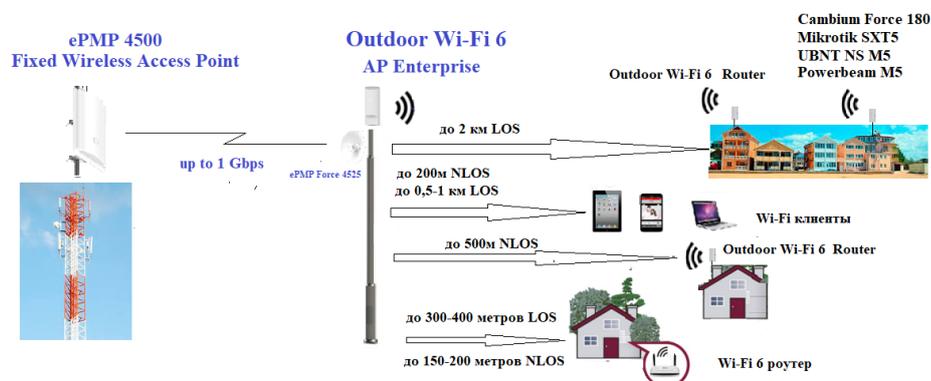


Рис.22 Схема организации связи сети Fixed Wi-Fi Access в частном секторе в пригороде и поселке.

Outdoor точки доступа в данной схеме устанавливаются на вышках мобильной связи, мачтах провайдера сети беспроводного доступа, опорах ЛЭП, крышах зданий из расчета каждые 500-700 метров вдоль улиц поселка. На одном из высоких мест в поселке, например вышке мобильной связи, водонапорной башне, трубах промышленных предприятий устанавливается базовая станция Fixed Wireless Access (FWA) ePMP 4500 Cambium Networks, которая в топологии точка-многоточка подает wireless каналы связи с пропускной способностью 500Mbps- 1Gbps на Outdoor точки доступа сети Fixed Wi-Fi Access. К базовой станция FWA подведен проходящий в поселок внешний канал (аплинк ) в Интернет.

Клиентские Indoor Wi-Fi роутеры устанавливаются внутри домов частного сектора, находящихся на удалении примерно до 300-400 метров LOS/NLOS от ближайшей Outdoor точки доступа сети Fixed Wi-Fi Access. Дома, находящие на большем удалении (до 1.5-2 км от точки доступа) оснащаются Outdoor Wi-Fi роутерами, которые устанавливаются на крыше или стене дома аналогично монтажу внешних антенн эфирного и спутникового телевидения. Такой Outdoor Wi-Fi роутер, находясь например на крыше частного дома, принимает Интернет по вайфай от ближайшей точки доступа провайдера сети Fixed Wi-Fi Access и одновременно раздает по вайфай Интернет во все помещения дома (том числе большого, на несколько этажей), а также на улице во дворе и на приусадебном участке.

К точке доступа WiFi 6 AP сети Fixed Wi-Fi Access могут также подключаться CPE 802.11n/ac Mikrotik SXT 5, SXT 5AC, а также CPE 802.11n Cambium Force 180, Ubiquity NS M5, PowerBeam M5 и др. на скорости до 200 Mbps.

Данная сеть Fixed Wi-Fi Access обеспечивает подключение в Интернет домовладений в частном секторе на скорости 100Mbps -1Gbps и является простой и эффективной альтернативой подключению в Интернет поселка по кабелю по технологии PON.