

**СПОСОБ РАЗВЁРТЫВАНИЯ
УДАЛЁННОГО ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО ПОСТА
АСМОС НА БАЗЕ МАКВИЛ**

**Е.А. Волкова, А.С. Рябышенков, А.А. Бахтин,
А.Е. Баскаков, С.А. Тен**

*НИУ МИЭТ, Зеленоград, Россия,
eavolkova2015@mail.ru, lnd_ecology@mail.ru,
tcs@miee.ru, 999924816@ya.ru,
ten.semen@mail.ru*

Аннотация. В работе рассматриваются принципы построения сетей цифровой сотовой связи стандарта МАКВИЛ для обеспечения сетевого взаимодействия компонентов системы автоматизированного мониторинга окружающей среды. Проведён анализ построения ядра сети МАКВИЛ, взаимодействия отдельных модулей ядра сети МАКВИЛ, описаны их основные функции. Приведены основные параметры, подлежащие конфигурации для базовой станции системы цифровой сотовой связи стандарта МАКВИЛ. Приведено описание программно-аппаратной реализации беспроводной сети связи с использованием концепции виртуализации сетевых функций. Разработан тестовый стенд цифровой сотовой связи для системы автоматизированного мониторинга окружающей среды, проведено измерение основных параметров сети связи. Полученные значения скорости передачи данных удовлетворяют требованиям АСМОС и составляют 400 кбит/с в нисходящей линии и 630 кбит/с в восходящей линии при конфигурации временных интервалов в соотношении 2:6, что позволяет обеспечить периодический сбор данных с подключаемых датчиков.

Ключевые слова: автоматизированный мониторинг, ядро сети МАКВИЛ, виртуализация сетевых функций.

**DEPLOYMENT OF A DIGITAL CELLULAR NETWORK
OF THE McWiLL STANDARD FOR AEMS**

**E.A. Volkova, A.S. Ryabyshenkov, A.A. Bakhtin,
A.E. Baskakov, S.A. Ten**

*National Research University of Electronic Technology (MIET), Zelenograd, Russia,
eavolkova2015@mail.ru, lnd_ecology@mail.ru,
tcs@miee.ru, 999924816@ya.ru,
ten.semen@mail.ru*

Abstract. The paper discusses the principles of building digital cellular networks of the McWiLL standard to ensure network interaction between the components of an automated environmental monitoring system. The analysis of the construction of the core of the McWiLL network, the interaction of individual modules of the core of the McWiLL network was carried out, their main functions were described. The main parameters to be configured for the base station of the digital cellular communication system of the McWiLL standard are given. A description of the software and hardware implementation of a wireless communication network using the concept of virtualization of

network functions is given. A test stand for digital cellular communications for an automated environmental monitoring system has been developed, and the main parameters of the communication network have been measured. The obtained data rates meet the requirements of AEMS and are 400 kbps in the downlink and 630 kbps in the uplink with a 2:6 time interval configuration, which allows for periodic data collection from connected sensors.

Keywords: automated monitoring, McWiLL network core, virtualization of network functions.

Введение

В условиях постоянно меняющейся экологической обстановки в мире всё более часто возникает необходимость в автоматизированных системах мониторинга, способных отслеживать изменения в состоянии окружающей среды и осуществлять своевременное информирование о них, что накладывает требования к надёжности и доступности беспроводной сети для подобных систем.

В настоящее время беспроводная связь является одним из самых значимых и стремительно развивающихся направлений в области разработки систем автоматизированного мониторинга. Современные системы сотовой связи предоставляют услуги голосовой связи и высокоскоростной пакетной передачи данных. Технологии интернета вещей объединяют миллиарды устройств в единую информационную сеть. Беспроводные локальные сети Wi-Fi повсеместно предоставляют миллионам людей доступ в Интернет [1–3].

Все эти технологии беспроводной связи объединяет одна проблема — они предоставляют только определённый перечень услуг. Существующие сети не могут одновременно обеспечивать голосовые сервисы, высокоскоростную передачу данных и передачу данных с сенсорных узлов с высокой доступностью и мобильностью при высокой плотности устройств.

Для решения вышеуказанной проблемы существует технология профессиональной беспроводной связи МАКВИЛ, которая позволяет строить не только сети связи операторского класса, предоставляющие все виды голосовых и мультимедийных сервисов, высокоскоростной обмен данными и потоковым видео с различными параметрами *QoS* и *GoS*, но и выделенные сети под определённые нужды заказчика, включая *M2M* и *IoT* с возможностью использования энергоэффективных приёмопередающих устройств и специального протокола для обработки коротких информационных сообщений с добавлением небольшого количества служебных данных [4–7]. Таким образом, сеть цифровой сотовой связи МАКВИЛ позволяет не только обеспечить АСМОС надёжной беспроводной связью, но и не ограничивает сеть от применения для других задач в то же время [8, 9].

Принципы построения сетей цифровой сотовой связи МАКВИЛ

Первым этапом построения системы беспроводной мобильной связи является исследование принципов построения сети и работы технологии МАКВИЛ. Так, в системе мобильной связи МАКВИЛ используется дуплекс с временным разделением (*TDD*) и применяется структура кадра длительностью 10 мс. При этом временные интервалы могут быть гибко распределены между нисходящей линией (*DL*) и восходящей линией (*UL*) в различных соотношениях.

Кадр (рис. 1) включает в себя: преамбулу, восемь временных интервалов для передачи трафика, распределённых между радиолиниями *DL* и *UL*, временной интервал запроса коррекции задержки (ЗКЗ), который применяется только для восходящей линии, и три защитных временных интервала (ЗВИ).

| | | | | | | |
|----------------------|---------------|-----------------------|----------------|----------------|-----------------------|---------------|
| Преамбула 160 мкс | ЗВИ 16 мкс | DL-трафик 4739 мкс | ЗВИ 218 мкс | ЗКЗ 128 мкс | UL-трафик 4699 мкс | ЗВИ 40 мкс |
|----------------------|---------------|-----------------------|----------------|----------------|-----------------------|---------------|

Рис. 1. Структура кадра с симметричным разделением временных интервалов

Временные интервалы трафика нисходящей и восходящей линий делятся на два типа: обычный и расширенный.

Обычные временные интервалы трафика на линии *DL* имеют длительность, равную 1116 мкс. Они состоят из мини-интервала системы адаптивного управления усилением (АУУ), а также 8 *OFDMA*-символов.

Обычные временные интервалы трафика на линии *UL* имеют длительность, равную 1106 мкс, и состоят из мини-интервала АУУ и 8 *OFDMA*-символов.

Длительность расширенного временного интервала нисходящей линии составляет 1391 мкс. Он включает в себя мини-интервал системы адаптивного управления мощностью (АУМ), а также 10 *OFDMA*-символов.

Расширенный временной интервал восходящей линии имеет длительность, равную 1381 мкс, и состоит из мини-интервала АУМ и 10 *OFDMA*-символов.

Соотношение временных интервалов трафика для нисходящей и восходящей линий можно гибко изменять, при этом последний интервал на линии в структуре кадра всегда является расширенным. Структура интервалов трафика для радиолиний *DL* и *UL* кадра с симметричным разделением временных интервалов (см. рис. 1) приведена на рис. 2 и 3 соответственно.

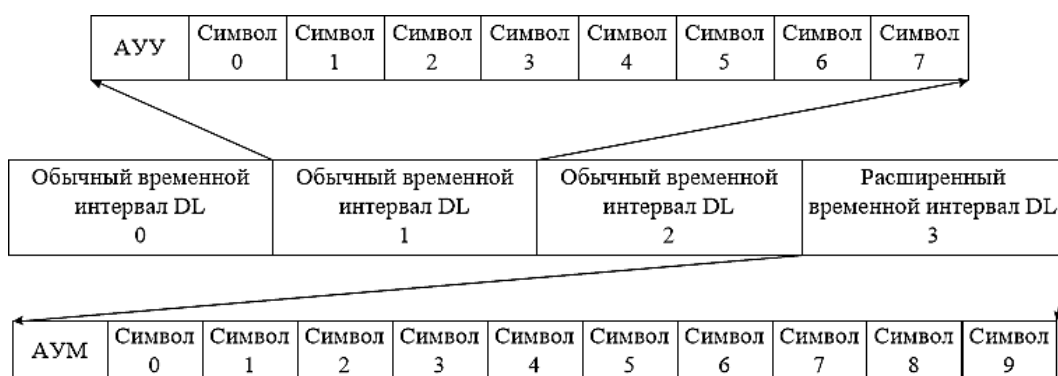


Рис. 2. Структура временных интервалов трафика нисходящей линии

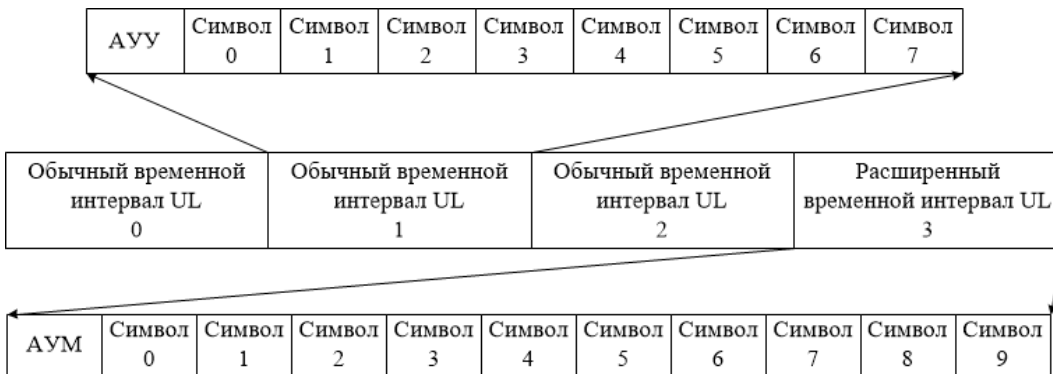


Рис. 3. Структура временных интервалов трафика восходящей линии

На рис. 4 представлено частотно-временное построение кадра. Из рисунка видно, что по оси времени кадр делится на восемь временных интервалов (от ВИ1 до ВИ8), а по оси частот полоса шириной 5 МГц разделена на пять групп поднесущих (от ГП1 до ГП5).

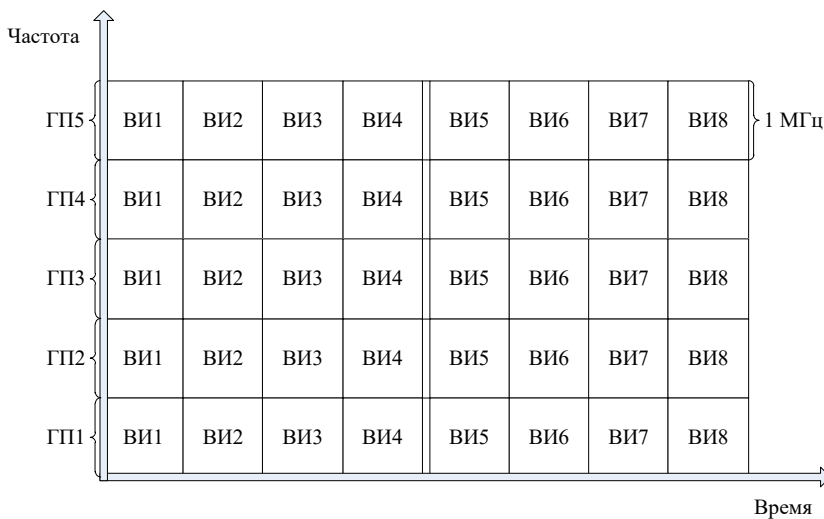


Рис. 4. Частотно-временное построение кадра

Архитектура сети цифровой сотовой связи МАКВИЛ в целом и ядра сети МАКВИЛ

Архитектура сети сотовой связи стандарта МАКВИЛ (рис. 5) включает в себя сеть доступа и базовую сеть. Сеть доступа состоит из базовых приёмопередающих станций и абонентского оборудования. Базовая сеть включает в себя ядро сети МАКВИЛ и другие функциональные элементы, состав которых определяется нуждами пользователей.

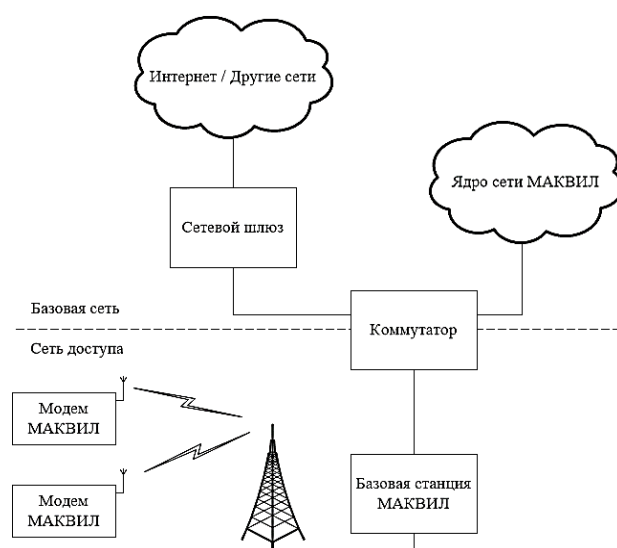


Рис. 5. Архитектура сети MAKVIL

Рассмотрим архитектуру сети более подробно (рис. 6). Основным компонентом базовой сети является ядро сети MAKVIL, в состав которого входят: шлюз агрегации служб, опорный регистр местоположения, центр обработки сообщений, центр диспетчерского управления, различные системы управления сетью [10, 11]. При необходимости набор функциональных элементов ядра сети можно дополнить или убрать компоненты, потребность в которых утрачена.

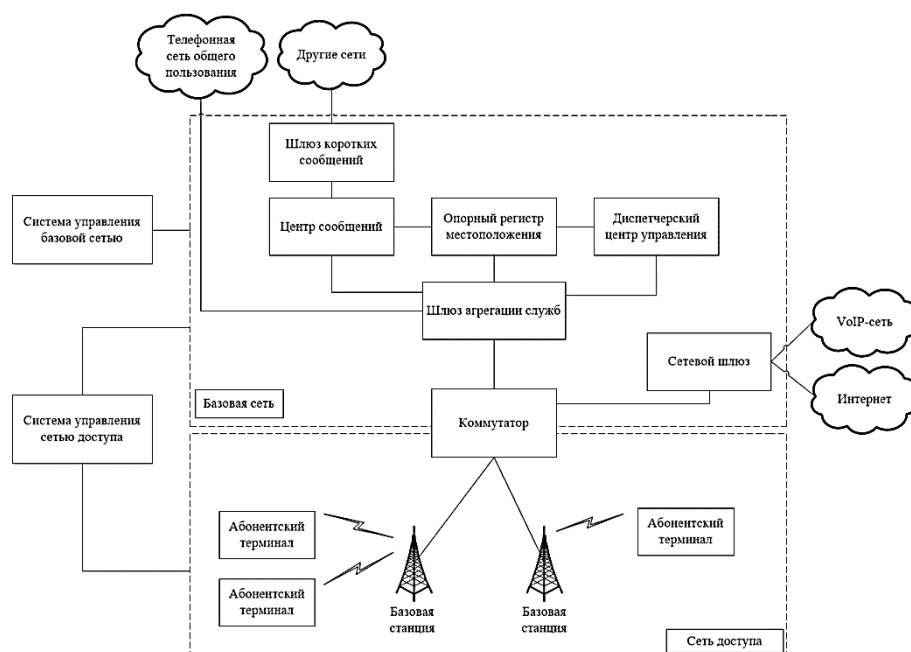


Рис. 6. Подробная архитектура сети MAKVIL

Шлюз агрегации служб (*SAG*) является высокопроизводительным программным коммутатором и отвечает за такие функции, как тарификация, управление вызовами и управление мобильностью. Поддерживает доступ к беспроводной сети МАКВИЛ, соединение с телефонной сетью общего пользования (ТфОП) и *VoIP*-сетью.

Опорный (домашний) регистр местоположения (*HLR*) — это база данных, содержащая информацию о пользователях и их устройствах в сети. Когда клиент выходит в роуминг, обслуживающий *HLR* способен осуществлять обмен информацией с другими *HLR* с целью передачи данных о регистрации и прочей информации на домашний регистр местоположения абонента [12–14].

Система диспетчерского управления состоит из клиентской и серверной частей. Клиент предоставляет необходимые интерфейсы для осуществления диспетчеризации вызовов и организации функций управления. Сервер осуществляет диспетчеризацию вызовов и сообщений управления от клиента к шлюзу агрегации служб и регистру опорного местоположения, а также ответных сообщений управления и вызовов от *SAG* и *HLR* к клиенту.

Центр сообщений реализует функционал службы коротких сообщений, осуществляет хранение передаваемых сообщений с целью обеспечения резервирования и отказоустойчивости, собирает биллинговую информацию. При помощи данного компонента может осуществляться обмен короткими сообщениями между абонентскими терминалами МАКВИЛ, а также между терминалами МАКВИЛ и терминалами других сетей при помощи шлюза коротких сообщений.

Система управления сетью доступа и система управления базовой сетью необходимы для проведения конфигурации и управления структурными элементами сети МАКВИЛ. Кроме того, системы управления собирают информацию о сбоях, осуществляют поиск и устранение неисправностей.

На сетевой шлюз возложены функции маршрутизации, межсетевого экрана, преобразования частных адресов в общедоступные, а также роль *DHCP*-сервера для клиентов, получающих *IP*-адреса динамически.

Коммутатор необходим для объединения в единую сеть всех компонентов, входящих в архитектуру сети передачи данных.

Сеть, организованная в соответствии с приведённой архитектурой, предоставляет голосовые сервисы, возможность отправки коротких сообщений и высокоскоростного обмена данными и потоковым видео с минимальными задержками для стационарных и подвижных абонентов, находящихся в зоне покрытия базовых станций. При этом сети стандарта МАКВИЛ гарантируют качество обслуживания и доступность сети связи даже в местах массового скопления абонентов. В случае необходимости набор предоставляемых услуг можно изменить путём пересмотра составляющих ядра сети МАКВИЛ и базовой сети в целом.

Программно-аппаратная реализация ядра сети МАКВИЛ для АСМОС

В состав ядра сети цифровой сотовой связи стандарта МАКВИЛ (рис. 7) для автоматизированной системы мониторинга окружающей среды входят следующие элементы:

- шлюз агрегации служб SAG5000, выполняющий функции управления мобильностью;
- опорный регистр местоположения HLR3000, который содержит базу данных с информацией об абонентах в сети МАКВИЛ;
- сервер управления iM Server, включающий в себя интегрированную систему управления сетью доступа iM5000 и интегрированную систему управления базовой сетью iM3000.



Рис. 7. Архитектура ядра сети МАКВИЛ для АСМОС

Ядро сети базируется на технологиях *NFV*, все его составляющие представляют собой специально сконфигурированные виртуальные машины, работающие под управлением серверной операционной системы с открытым исходным кодом *CentOS*, что обеспечивает аппаратную независимость [15].

Платформой для размещения ядра беспроводной сети передачи данных служит стоечный сервер *Lenovo ThinkSystem SR530* под управлением аппаратного гипервизора *VMware ESXi*, обладающего средствами управления виртуальными машинами и аппаратными ресурсами физической машины. Основные технические характеристики сервера указаны в таблице.

На рис. 8 представлена архитектура системы виртуализации ядра сети сотовой связи МАКВИЛ для автоматизированной системы мониторинга окружающей среды.

Таблица

Технические характеристики сервера Lenovo ThinkSystem SR530

| Параметр | Спецификация |
|------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------|
| Форм-фактор | Стойный сервер 1U |
| Количество процессоров | 2 |
| Процессор | Intel Xeon Gold 5120 2.20GHz |
| Оперативная память | 64 Гб DDR4 |
| Накопители | 1Тб SSD (SATA III) |
| Электропитание | Два блока питания мощностью 550 Вт |
| Сетевые интерфейсы | 2 порта 10/100/1000 Base-T для передачи данных, 1 порт 10/100/1000 Base-T для управления |

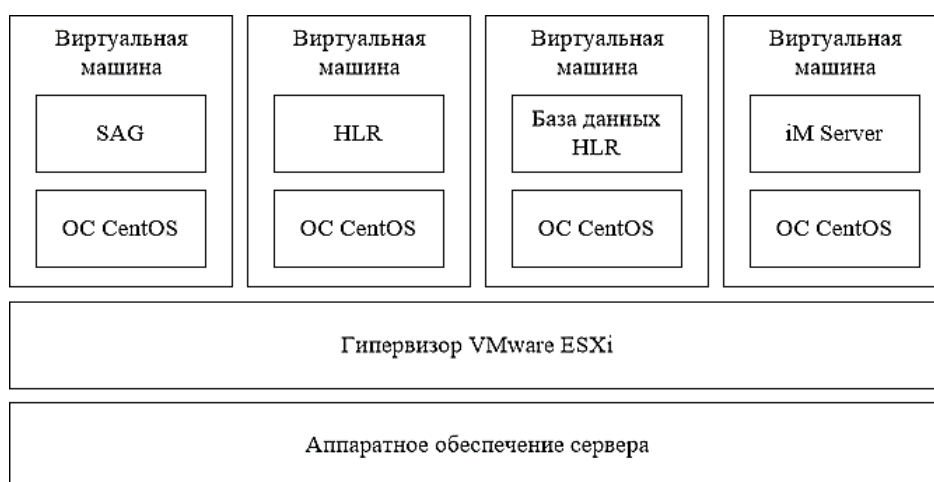


Рис. 8. Архитектура системы виртуализации ядра сети МАКВИЛ для АСМОС

Виртуальная машина с *SAG* содержит в себе все необходимые программные компоненты для реализации шлюза агрегации служб и всех его функциональных возможностей, таких как управление мобильностью, управление различными службами и др. Представляет собой компонент SAG5000 в архитектуре ядра сети МАКВИЛ для АСМОС.

Виртуальные машины с *HLR* и базой данных *HLR* содержат все необходимые программные элементы для реализации опорного регистра местоположения и в совокупности представляют собой компонент HLR3000 в архитектуре ядра сети МАКВИЛ для АСМОС.

Виртуальная машина с *iM Server* состоит из программного обеспечения, реализующего сервер системы управления сетью доступа iM5000 и сервер системы управления базовой сетью iM3000. Данная виртуальная машина представляет компонент iM Server в архитектуре ядра сети МАКВИЛ для АСМОС.

Разработка тестового стенда и проведение испытаний

Для проведения испытаний сети цифровой сотовой связи стандарта МАКВИЛ был разработан тестовый стенд (рис. 9), включающий в себя компактный измерительный пост, состоящий из концентратора данных, нескольких датчиков и модема, сеть цифровой сотовой связи стандарта МАКВИЛ и удалённый сервер автоматизированной системы мониторинга окружающей среды.

Концентратор данных на базе миниатюрного компьютера Raspberry Pi осуществляет сбор информации, поступающей от датчиков температуры и влажности, и отправляет ее на сервер АСМОС [16].

Измерительный пост подключается к сети сотовой связи посредством модема МЕМ638.

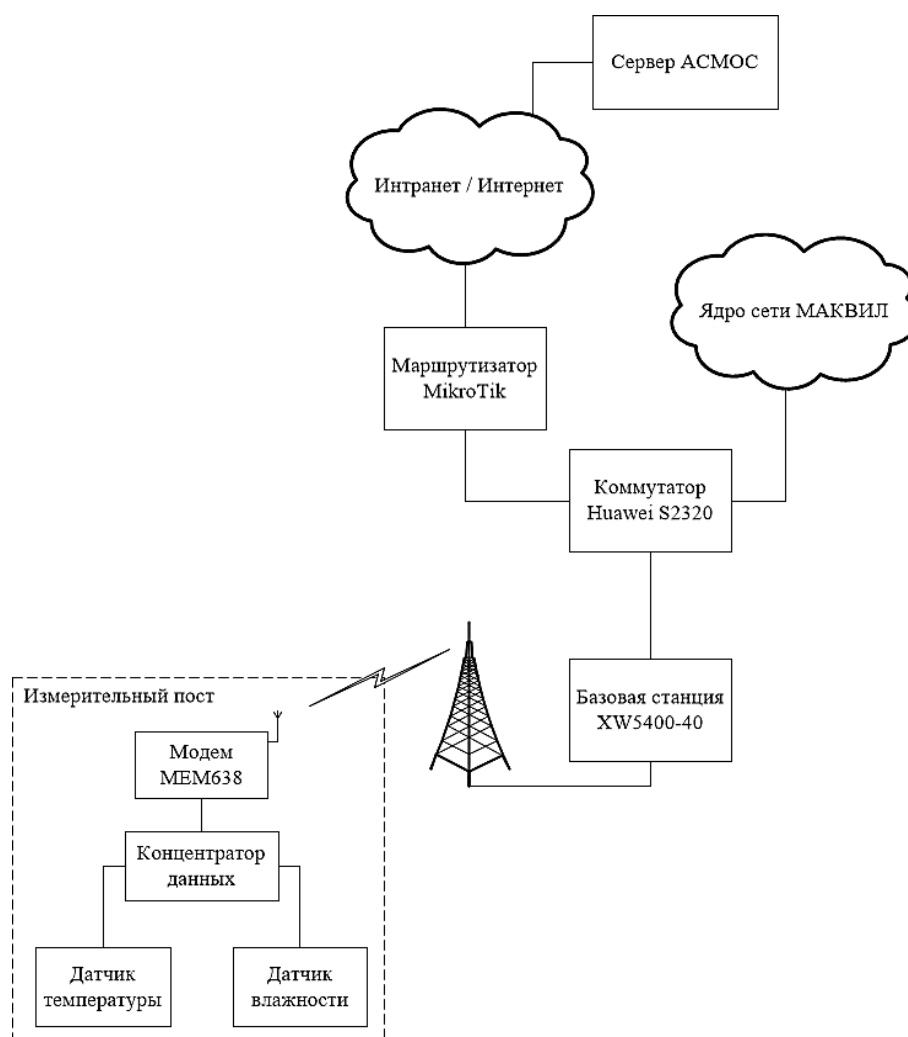


Рис. 9. Схема тестового стенда

После включения терминал детектирует преамбулу кадра и начинает искать широкополосный канал (*BCH*), чтобы получить необходимую служебную информацию от базовой станции. После прослушивания данного канала терминал определяет соотношение асимметрии нисходящей линии *DL* и восходящей линии *UL*, производя синхронизацию с нисходящей линией.

Затем осуществляется запрос случайного доступа (*RA*) в канале случайного доступа (*RACH*), ответ на который приходит в канале ответа на запрос случайного доступа (*RARCH*) и содержит информацию, необходимую для синхронизации с восходящей линией.

После осуществления синхронизации с восходящей линией терминал начинает регистрацию, процесс которой приведён на рис. 10.

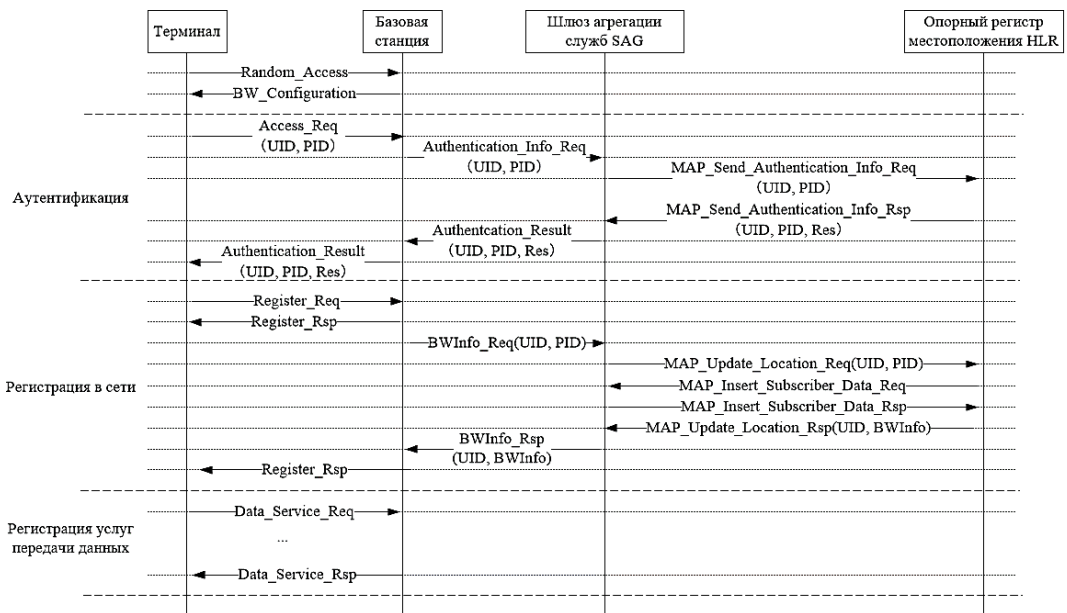


Рис. 10. Временная диаграмма процесса регистрации терминала в сети

Сначала производится аутентификация терминала, после успешного прохождения которой происходит обновление местоположения абонентского устройства в сети и определяются доступные услуги. Далее происходит регистрация услуг передачи данных, по завершении которой терминал может передавать данные, поступающие с концентратора данных.

Данные с модема передаются напрямую в сеть Интранет/Интернет и попадают на сервер автоматизированной системы мониторинга окружающей среды.

Сервер производит обработку полученной информации и выводит данные о показателях температуры и влажности воздуха, переданные с соответствующих датчиков тестового стенда, на панель мониторинга, приведённую на рис. 11. Так, на представленном рисунке отображён результат сбора данных

об измеряемых параметрах с подключаемых с помощью беспроводного соединения концентраторов данных в автоматизированном режиме. Во время тестирования не было обнаружено искажённых или отброшенных пакетов данных, что подтвердило возможность применения МАКВИЛ в рамках систем автоматизированного мониторинга окружающей среды.

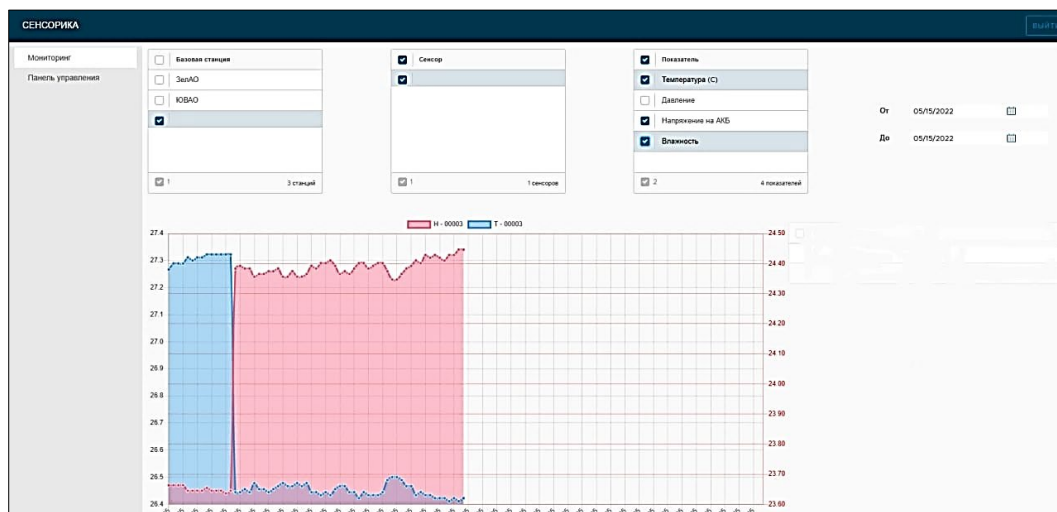


Рис. 11. Панель мониторинга сервера АСМОС

Результаты измерений представлены в виде графика, приведённого на рис. 12. Так, получена зависимость скорости передачи данных нисходящего и восходящего каналов от параметра соотношения временных интервалов последних, а именно требуемая скорость передачи данных 400 кбит/с вниз и 630 кбит/с вверх была получена при соотношении 2:6, где меньшая составляющая интервала — нисходящая линия. Полученные значения в полной мере удовлетворяют требованиям системы АСМОС, что позволяет размещать до 100 концентраторов данных в пределах одной соты. При тестировании передачи данных от устройства концентратора данных до центрального сервера системы не возникало дополнительных задержек, вызванных образованием очередей на промежуточных устройствах, а именно базовой станции и компонентах ядра сети МАКВИЛ, что дополнительно подтверждает возможность применения цифровой сотовой сети МАКВИЛ в системах автоматизированного мониторинга окружающей среды с целью передачи данных об измеряемых параметрах.

Измерение производилось при помощи клиент-серверной утилиты iPerf, предоставляющей возможности генерации трафика для тестирования пропускной способности каналов связи.

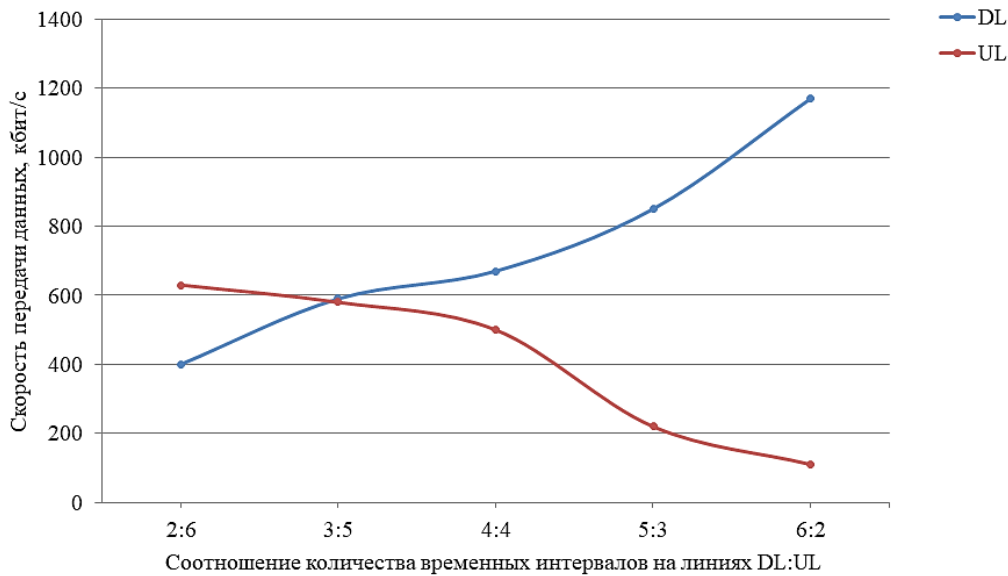


Рис. 12. График зависимости скорости передачи данных на линиях *DL* и *UL* от соотношения асимметрии этих линий

Заключение

В работе рассмотрены способы построения сети цифровой сотовой связи стандарта МАКВИЛ. В результате работы развернута сотовая сеть МАКВИЛ с возможностью подключения измерительных постов АСМОС с использованием модемного соединения.

Рассмотрены основные компоненты ядра сети МАКВИЛ, приведено описание программно-аппаратной реализации последнего с использованием концепции *NFV*, что позволило разместить все компоненты ядра сети МАКВИЛ на базе одного вычислительного сервера.

Разработан тестовый стенд, состоящий из измерительного поста, сети цифровой сотовой связи стандарта МАКВИЛ и сервера автоматизированной системы мониторинга окружающей среды.

На тестовом стенде проведены измерения параметров скорости передачи данных в нисходящей и восходящей линиях в зависимости от установленного разделения временных интервалов для данных линий в структуре кадра. Предпочтительным соотношением асимметрии временных интервалов нисходящей линии *DL* и восходящей линии *UL* является 2:6, поскольку большая часть потока данных с измерительных постов автоматизированной системы мониторинга окружающей среды приходится на передачу информации о состоянии окружающей среды на сервер автоматизированной информационной системы мониторинга, а принимаемый трафик представлен лишь служебными и управляющими сообщениями.

Работа была выполнена при финансовой поддержке центра НТИ «Сенсорика» в НОЦ РЦСС НИУ МИЭТ в рамках проекта «Создание автоматизированной системы мониторинга окружающей среды (АСМОС) для сбора, обработки, хранения и передачи метеорологической и экологической информации», рег. № НИОКТР: АААА-А20-1200130090100-3.

Список литературы

1. Deng C., Fang X., Han X., Wang X., Yan L., He R., Guo Y. IEEE 802.11 be Wi-Fi 7: New challenges and opportunities // *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. — 2020. — V. 22. — No. 4. — P. 2136–2166.
2. Pahlavan K., Krishnamurthy P. Evolution and impact of Wi-Fi technology and applications: a historical perspective // *International Journal of Wireless Information Networks*. — 2021. — V. 28. — No. 1. — P. 3–19.
3. Bassoli M., Bianchi V., De Munari I. A plug and play IoT Wi-Fi smart home system for human monitoring // *Electronics*. — 2018. — V. 7. — No. 9. — P. 200.
4. Wu Q., He K., Chen X. Personalized federated learning for intelligent IoT applications: A cloud-edge based framework // *IEEE Open Journal of the Computer Society*. — 2020. — V. 1. — P. 35–44.
5. Лесников А.С., Суворов А.П. Особенности технологии Интернет вещей // *Вестник Воронежского института высоких технологий*. — 2020. — № 2. — С. 24–27.
6. Иванов А.В. Региональный экологический мониторинг эпохи Интернета вещей // *Управление техносферой*. — 2018. — Т. 1. — № 2. — С. 165–184.
7. Москаленко Т.А., Киричек Р.В., Кучерявый А.Е. Обзор протоколов Интернета вещей // *Информационные технологии и телекоммуникации*. — 2017. — Т. 5. — № 2. — С. 1.
8. Шорин О.А., Каспари Р.Ю. Рынок корпоративных пользователей и технология широкополосного мобильного доступа McWiLL // *Электросвязь*. — 2017. — № 1. — С. 16–21.
9. Шорин О.А., Косинов М.И., Каспари Р.Ю., Осин В.В. Анализ перспектив внедрения технологий McWiLL на российском телекоммуникационном рынке // *Экономика и качество систем связи*. — 2017. — № 1 (3). — С. 25–40.
10. Войцеховский В.Н., Черников Д.Ю. Подсистема транкинговой связи в составе мультисервисной сети широкополосного радиодоступа McWiLL // *Современное состояние и перспективы развития специальных систем радиосвязи и радиоуправления*. — 2018. — С. 28–34.
11. Аверьянов Р.С., Акимов В.Н. Структура ядра сети Маквил (McWiLL) // *Мобильный бизнес: перспективы развития и реализации систем радиосвязи в России и за рубежом*. — 2014. — С. 3–15.

12. Vani H.Y. Building, Deploying and Validating a Home Location Register (HLR) using Jenkins under the Docker and Container Environment // 2020 International Conference on Smart Electronics and Communication (ICOSEC). — IEEE, 2020. — P. 1278–1282.
13. Kim J.H. Consistency preservation techniques for Location Register System in Mobile Networks // International Journal of Internet, Broadcasting and Communication. — 2020. — V. 12. — No. 2. — P. 144–149.
14. Bakare B.I., Ekanem I.A., Allen I.O. Appraisal of global system for mobile communication (GSM) in Nigeria // American Journal of Engineering Research. — 2017. — V. 6. — No. 6. — P. 97–102.
15. Бужин И.Г., Антонова В.М., Миронов Ю.Б., Антонова В.А. Анализ опасных событий и уязвимостей существующих транспортных сетей связи 5G // Труды МАИ. — 2022. — С. 25.
16. Волкова Е.А., Севрюкова Е.А., Баскаков А.Е. Оценка эффективности программно-аппаратного комплекса концентратора данных в АСМОС // Альманах современной метрологии. — 2021. — № 2 (26). — С. 126–141.

Статья поступила в редакцию: 26.07.2022 г.

Статья прошла рецензирование: 26.07.2022 г.

Статья принята в работу: 27.07.2022 г.