

## **5. ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗАЦИИ**

---

УДК 004.75, 004.94

**А.М. Заяц, С.П. Хабаров**

### **МОДЕЛИРОВАНИЕ В СРЕДЕ OMNET++ ПРОЦЕССОВ ПОДКЛЮЧЕНИЯ В WI-FI СЕТЯХ**

*Введение.* В лесном хозяйстве и лесной промышленности все большее распространение получают современные беспроводные технологии и элементы Интернета вещей (IoT). Уже на законодательном уровне обсуждается вопрос об обязательном использовании в России электронных меток для маркировки дуба, бука и ясеня: правительство РФ разрабатывает соответствующее положение [Парламентская газета, 2019]. В рамках задачи борьбы с незаконным оборотом ценных пород древесины холдинг «Росэлектроника» разработал RFID-метки, работающие в диапазоне от  $-40$  до  $+65$  градусов и выдерживающие ударную нагрузку до 5 тонн. В ходе их испытаний получены близкие к 100% результаты идентификации древесины в лесовозе и вагоне при считывании стационарным RFID-порталом на расстоянии до 11 м [Пресс-релиз Ростеха, 2018].

Учет и сертификация лесоматериалов требуют надежных систем идентификации по всей цепочке поставок, начиная с инвентаризации стоящих деревьев. Но пока мало данных о способности RFID-меток противостоять климатическому и биологическому износу в лесах в течение длительного времени. В этом плане интересно исследование Джанни Пикки в институте биоэкономики (Сесто Фиорентино, Италия), в котором он для оценки выбрал семь типов RFID-меток UHF диапазона и испытывал их для маркировки стоящих деревьев в течение двух лет [Gianni Picchi, 2020].

Другим, несколько отличным от использования стандартных RFID-меток, является подход, который используется в беспроводных сенсорных сетях мониторинга лесных территорий. Технологии Интернета вещей (IoT) быстро развиваются и дают уникальную перспективу улучшить возможно-

сти экологического мониторинга при крайне низких затратах. IoT эволюционировал от конвергенции беспроводных технологий, микроэлектромеханических систем (MEMS) и Интернета. Развитие этих технологий в области экологического мониторинга позволяет в режиме реального времени передавать данные от многочисленных недорогих точек мониторинга.

Одной из таких систем стал проект Nature 4.0, в рамках которого разработано устройство TreeTalker©, способное измерять движение воды в деревьях, диаметральный рост, спектральные характеристики листьев, микроклиматические параметры и передавать эти данные в реальном времени. Эта система может использоваться для мониторинга деревьев в различных контекстах: от управления лесными и городскими зелеными инфраструктурами до глубоких экологических исследований [Valentini, 2020].

Рассмотренные два класса систем имеют принципиальное отличие. Так, например, первые [Санников, 2017; Вагизов, 2020] используют технологию беспроводной связи сверхблизких коммуникаций типа RFID, NFC или iBeacon с дальностью связи до 10-15 метров. В то время как вторые [Зяец, Хабаров, 2019] используют технологии типа Wi-Fi или Bluetooth 4.0-5.0 с дальностью связи более 100 м.

Технология Bluetooth Low Energy (BLE, Bluetooth 5.0) в отличие от предыдущих стандартов изначально ориентирована на применение в системах сбора данных и мониторинга с автономным питанием. Устройства на базе BLE потребляют в 10-20 раз меньше энергии и способны передавать данные в 50 раз быстрее, чем классические Bluetooth-решения. Однако в настоящее время большинство систем мониторинга использует технологию Wi-Fi или даже прямое подключение к Интернету.

*Постановка задачи.* В этих условиях при проектировании беспроводных систем мониторинга возникает необходимость исследования процесса распространения радиоволн в лесном массиве [Санников, 2017], а также учета энергопотребления и мобильности узлов сети [Зяец, Хабаров, 2020]. Такие исследования наиболее просто осуществлять при наличии математических или имитационных моделей функционирования системы. В этих условиях задача построения имитационной модели для анализа процесса функционирования роуминга в Wi-Fi сетях представляется достаточно актуальной.

Построение модели с учетом мобильности отдельных узлов сети потребовало: во-первых, формирования модели подключения и ассоциации двух Wi-Fi устройств, и во-вторых, описания модели переподключения мобильного узла сети к точке доступа (Access Point, AP) с более мощным

радиосигналом. При этом принимается во внимание, что в соответствии со стандартом IEEE 802.11 процесс подключения узла сети к AP состоит их шести этапов, в результате которых отдельные устройства обмениваются между собой соответствующими фреймами управления (рис. 1).

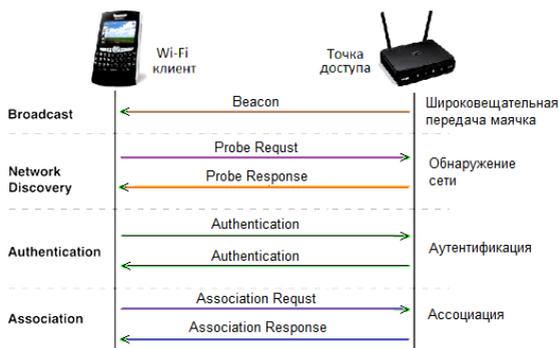


Рис. 1. Процесс подключения узла сети к точке доступа

Fig. 1. The process of connecting a network node to an access point

Прежде чем подключиться к какой-либо Wi-Fi сети, любой беспроводной клиент должен её обнаружить и найти. Для того, чтобы у клиентов была такая возможность, точки доступа отправляют в радиоэфир широковещательные пакеты для анонсирования своего присутствия. Такие пакеты получили название Beacon (кадры-маячки или просто маячки). Точки доступа безостановочно отправляют кадры-маячки в радиоэфир через интервал времени, который при стандартных настройках составляет 100 мс. В структуре кадра-маячка присутствуют такие поля, как имя сети, частоты передачи данных, поддерживаемые точкой доступа, рабочий радиоканал, стандарт используемой сети, уровень сигнала и ряд других параметров. Имея эту информацию, беспроводной клиент может выполнить подключение именно к той сети, которая ему необходима.

В настоящей статье рассмотрен пример построения в среде OMNeT++ INET имитационной модели беспроводной Wi-Fi сети для обслуживания мобильного клиента двумя AP. Модель позволяет проанализировать взаимодействие клиента и AP, включая маяки, активное сканирование, процессы аутентификации и ассоциации. Кроме этого, появляется возможность установить влияние мощностей передатчиков и чувствительности приемников на диапазон устойчивой связи между узлами сети с возможностью организации роуминга между ними.

*Методика исследования.* В разрабатываемой модели клиент использует активное сканирование. Обнаружив доступные AP, решает, к какой из них присоединиться, и инициирует обмен кадрами аутентификации. После успешной аутентификации клиент начинает обмен с AP фреймами ассоциации, во время которого согласуются типы шифрования и другие возможности стандарта 802.11. После чего AP предоставляет доступ клиенту к сети, и по завершению подключения, может начаться обмен данными.



Рис. 2. Пример беспроводной Wi-Fi сети  
 Fig. 2. Example of a wireless Wi-Fi network

В качестве примера для построения в среде OMNeT++ INET имитационной модели рассмотрена беспроводная сеть (рис. 2), которая:

- Имеет две AP, которые находятся на расстоянии 400 м друг от друга и работают на каналах 1 (AP\_1) и 3 (AP\_2), соответственно.
- Клиент с течением времени перемещается из диапазона радиодоступа одной AP в диапазон другой AP. Он настроен на активное сканирование 4 каналов (с 0 по 3). На клиенте нет приложений, использующих отправку или получение данных, так как в примере планируется исследовать только процессы подключения клиента к AP.
- В процессе работы клиент сканирует наличие точек доступа и выбирает ту, которая имеет самый мощный радиосигнал. Подключившись к ней, он продолжает получать кадры маячков.

Для решения поставленной задачи необходимо в среде OMNeT++ INET сконфигурировать новое рабочее пространство, описать в редакторе NED-файлов структуру сети и сформировать файл начальной инициализации, которые соответствуют описанному выше примеру Wi-Fi сети.

Особенностью модели (рис. 3) от рассмотренных ранее [Dumov, Khabarov, 2019; Хабаров, Думов, 2020] является то, что в ее составе появился такой компонент фреймворка INET, как AccessPoint. Его структуру можно отобразить в окне графического редактора NED, выполнив двойной клик по его пиктограмме на основной схеме сети.

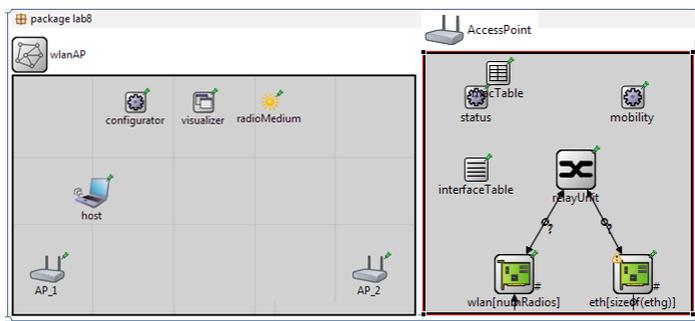


Рис. 3. Основная схема сети и структура компонента AccessPoint  
 Fig. 3. Basic network diagram and structure of AccessPoint component

Данный компонент представляет собой составной модуль, который может поддерживать несколько беспроводных интерфейсов и портов Ethernet. Модуль InterfaceTable представляет собой таблицу сетевых интерфейсов (eth0, wlan0 и т. д.) конкретного устройства, а модуль macTable сохраняет связь между конкретными сетевыми интерфейсами и соответствующими им MAC-адресами. Модуль relayUnit обеспечивает функциональность коммутатора Ethernet, ретранслируя кадры в соответствующие порты на основе их MAC-адресов, используя для этого данные, хранимые в macTable. Кроме этого на relayUnit возлагаются функции по буферизации кадров и управлению очередью их отправки.

Это, применительно к разрабатываемой модели, позволяет упрощенно считать, что компонент AccessPoint работает в режиме свитча, просто транслируя трафик без каких-либо операций с ним. Исходник wlanAP.ned, полученный по графической схеме, будет иметь вид:

```
import
net, physicallayer.ieee80211.packetlevel.Ieee80211ScalarRadio
Medium;
import inet.node.wireless.AccessPoint;
import inet.node, inet.WirelessHost;
import inet.physicallayer.idealradio.IdealRadioMedium;
import
inet.networklayer.configurator.ipv4.IPv4NetworkConfigurator;
import
inet.visualizer.integrated.IntegratedCanvasVisualizer;
network wlanAP {
  submodules:
    configurator: IPv4NetworkConfigurator {
      @display("p=149,29"); }
    radioMedium: Ieee80211ScalarRadioMedium {
      @display("p=317.52002,29.232"); }
    AP_1: AccessPoint {
      @display("p=50,250"); }
    AP_2: AccessPoint {
      @display("p=450,250"); }
    visualizer: IntegratedCanvasVisualizer {
      @display("p=234.86401,29.232"); }
    host: WirelessHost {
      @display("p=100,150"); }
}
```

После описания структуры сети, надо определить параметры ее функционирования и провести имитационное моделирование. Так как основной целью настоящей статьи является знакомство с процессом установления связи беспроводных клиентов с точками доступа, т. е. работе сети на двух нижних уровнях протокольного стека, то на первом этапа исследования модели файл начальной инициализации `omnetpp.ini` может иметь вид:

```
[General]
network = wlanAP
# Задание параметров горизонтального перемещения хоста беспроводной сети
*.host.mobilityType = "LinearMobility"
*.host.mobility.speed = 10mps
*.host.mobility.angle = 0deg
*.host.mobility.constraintAreaMaxX = 450m
*.host.mobility.constraintAreaMinX = 50m
# Адреса узлов сети
*.AP 1.wlan[*].mac.address = "10:10:10:10:10:10"
*.AP 2.wlan[*].mac.address = "20:20:20:20:20:20"
*.host.wlan[*].mac.address = "90:80:70:60:50:40"
# Визуализация областей радиодоступности точек доступа (AP)
*.AP *.wlan[*].radio.displayCommunicationRange = true
# Мощность передатчиков всех узлов сети
**.wlan[*].radio.transmitter.power = 1mW
# Периодичность отправки маячков с точек доступа
*.AP *.wlan[*].mgmt.beaconInterval = 100ms
```

Этот файл, имея простейшую структуру, определяет всего несколько параметров работы модели. При этом все остальные, необходимые для функционирования модели, принимают значения, которые по умолчанию определены в основных компонентах фреймворка INET.

*Результаты исследования.* Состояние модели пока соответствует упрощенному варианту поставленной задачи, так как не учитывает настройку узлов сети на определенные радиоканалы, но зато позволяет получить общее представление о работе сети в инфраструктурном режиме. Для исследования модели полезно после ее загрузки, но еще до запуска, дополнительно открыть окно ассоциаций узла `host`, и после этого запустить модель в работу в ускоренном режиме (FAST).

В процессе моделирования будет видно, как на первых шагах работы модели узел `host` выполнит подключение к точке доступа `AP_1`. О том, что подключение выполнено именно к этой точке доступа свидетельствует MAC адрес, отображаемый в окне ассоциаций узла `host`. Там же видно, что для связи использован нулевой радиоканал (`chan=0`), что обусловлено принятыми пока по умолчанию параметрами работы модели.

При продвижении узла `host` к границе радиодоступа `AP_1` связь разрывается (`addr=00-00-00-00-00-00`, `chan=-1`), узел перестал принимать маячки, хотя `AP_1` их передает. При подходе к точке `x=300` м, чувствительности его приемника уже достаточно, чтобы принять отправляемые каждые 100 мс маячки от `AP_2` и выполнить подключение к этой точке доступа. При этом, как и в первом случае, имя сети будет `ssid=SSID` (по умолчанию).

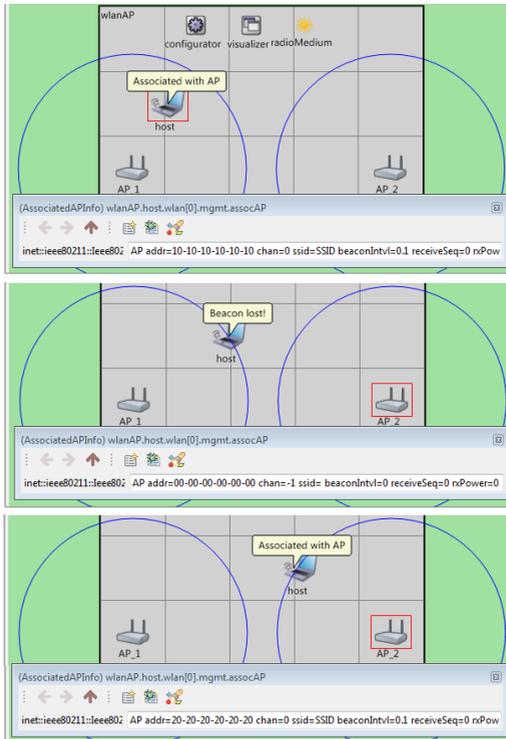


Рис. 4. Процесс моделирования перемещения узла host  
 Fig. 4. The process of modeling host relocation

Остановив процесс моделирования и перезапустив его в обычном режиме (RUN), можно получить представление о процессах, которые происходят на начальных шагах работы модели сети (рис. 5).

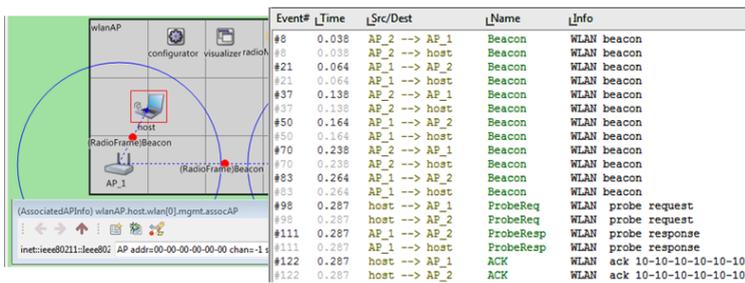


Рис. 5. Первые шаги работы модели  
 Fig. 5. The first steps of the simulation process

Так как процесс моделирования в обычном режиме идет достаточно продолжительное время, то для изучения процессов взаимодействия узлов сети в критически важные моменты времени имеет смысл после остановки процесса моделирования выполнять перезагрузку модели и выбирать режим “Run until time or event number (Ctrl+F5)”. После чего, используя окно Run Until, устанавливать режим моделирования FAST до некоторого, нужного момента времени или события, а после остановки модели в нужный момент продолжить ее работу в пошаговом (STEP) или обычном (RUN) режимах работы. Так, для просмотра окончания процесса ассоциации узла host с точкой AP\_1 можно использовать окно Run Until, задав в нем значение “Event number to stop at” равное 336 и нажать кнопку ОК. После приостановки процесса можно продолжить его в режиме STEP или RUN. Аналогичные исследования в окрестности точек разрыва связи с AP\_1 и подключения к AP\_2, могут быть выполнены при приостановках процесса моделирования в окрестности событий 3050 и 6900, соответственно.

**Модель сети с перекрытием областей радиодоступа.** Прежде чем перейти к данному вопросу потребовалось выяснить, а почему диапазоны работы AP\_1 и AP\_2 составляли, если верить графике, около 175 м. Единственным параметром, отвечающим за радиообмен, который был определен в omnetpp.ini, является мощность передатчиков узлов сети. Им для простоты было присвоено значение:

$$P_t = 1 \text{ мВт} = 0 \text{ дБм.}$$

Однако если принять во внимание, что проектируемая модель использует компонент модели среды типа Ieee80211ScalarRadioMedium, который описывает распространение волн в свободном пространстве, то в этом случае будет справедливо, что

$$P_t, \text{ дБм} - P_r, \text{ дБм} = 32.45 + 20 \lg(d, \text{ м}) + 20 \lg(f, \text{ ГГц}),$$

откуда можно найти, что

$$d = 10^{(P_t - P_r - 32.45 - 20 \lg(2.445)) / 20},$$

а при условии, что  $P_t = 0 \text{ дБм}$

$$d = 10^{0.05 \cdot (-P_r - 40.216)}.$$

На данный момент неизвестен только один параметр, а именно чувствительность радиоприемников узлов сети. Если обратить внимание на все те параметры, которые использует проектируемая сеть, то среди них можно найти и те, что отвечают за чувствительность приема. Именно эти значения проектируемая модель принимает по умолчанию для AP (рис. 6).

Parameter	Value	Remark
wlanAP.AP_1.wlan[*].radio.receiver.energyDetection	-85dBm	NED default applied implicit
wlanAP.AP_1.wlan[*].radio.receiver.sensitivity	-85dBm	NED default applied implicit

Рис. 6. Чувствительность приемников точек доступа

Fig. 6. Sensitivity of access point receivers

Аналогично можно найти и чувствительность приемника узла host (рис. 7).

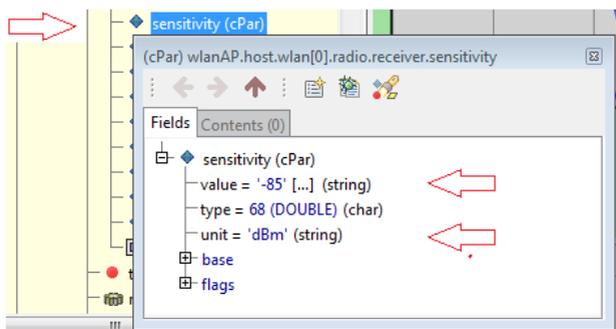


Рис. 7. Чувствительность приемника узла host

Fig. 7. Sensitivity of the host receiver

Из этих вариантов поиска видно, что установленные по умолчанию во фреймворке INET значения чувствительности приемников равны  $-85$  дБм, что в абсолютных единицах составляет  $3.16E-09$  мВт. Это позволяет вычислить область радиодоступа узлов сети, которая будет равна

$$d = 10^{0.05(85 - 40.216)} = 10^{2.2392} = 173,5 \text{ м,}$$

что дает достаточно хорошее соответствие тому, что было получено при запуске модели на выполнение. Если мощность передатчиков повысить до 2 мВт (что соответствует 3.01 дБм), то в этом случае можно получить

$$d = 10^{0.05(3.01 + 85 - 40.216)} \approx 245 \text{ м,}$$

а это подходит для моделирования перекрывающихся диапазонов точек доступа. Поэтому в файл `omnetpp.ini` можно добавить новую секцию

```
[Config step1]
# Изменение мощности передатчиков всех узлов
**wlan[*].radio.transmitter.power = 2.0mW
```

и повторно провести процесс моделирования и исследования сети (рис. 8).

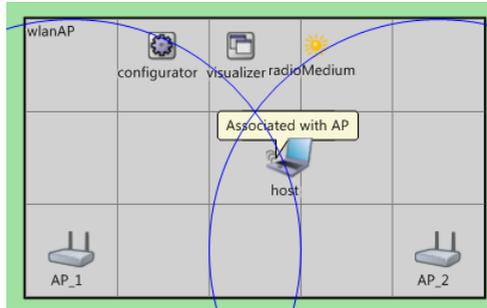


Рис. 8. Модель сети с перекрытием зон радиодоступа узла host к AP  
 Fig. 8. Network model with overlapping zones of radio access node host to AP

Результаты работы данной модели во многом повторяют уже полученные результаты, но и эта модель пока также является упрощенным вариантом поставленной задачи.

**Модель сети для исходной задачи.** Напомним, что в исходной постановке сеть должна содержать две точки доступа и хост, линейно перемежающийся между ними в горизонтальном направлении. Точки доступа должны быть настроены на использование каналов 1 и 3, соответственно, а хост, чтобы иметь возможность подключения к этим точкам доступа должен уметь проводить активное сканирование 4 каналов (с 0 по 3). Первая часть данной задачи уже была реализована в основной секции файла `omnetpp.ini`. Для реализации второй части надо, используя начальную область радиодоступа, дополнить этот файл еще одной секцией:

```
[Config step2]
description="Real model"
# --- Параметры точек доступа
*.AP 1.wlan[*].mgmt.ssid = "WLAN-AAA"
*.AP 2.wlan[*].mgmt.ssid = "WLAN-BBB"
# --- Настройка беспроводных радио каналов
*.AP 1.wlan[*].radio.channelNumber = 1
*.AP 2.wlan[*].radio.channelNumber = 3
# Начальный номер канала, с которого начинается сканирования
*.host.wlan[*].radio.channelNumber = 0
# Общее количество сканируемых каналов
**.mgmt.numChannels = 4
# Режим шифрование: Open System (2): WEP (4)
**.wlan[*].mgmt.numAuthSteps = 4
# Выбор режима активного сканирования (он по умолчанию)
**.wlan[*].agent.activeScan = true
# --- Конфигурация беспроводного соединения
**.wlan*.bitrate = 54Mbps
# Доступно сканирование и подключение к любым ssid
**.wlan[*].agent.default_ssid = ""
# Список номеров каналов для сканирования (" - все)
**.wlan[*].agent.channelsToScan = ""
# Интервалы времени активного сканирования канала
**.wlan[*].agent.probeDelay = 0.1s
**.wlan[*].agent.minChannelTime = 0.15s
**.wlan[*].agent.maxChannelTime = 0.3s
```

В самом начале процесса имитационного моделирования клиент начинает сканировать каналы, выполняя поиск какой-нибудь точки доступа (\*\*.wlan[\*].agent.default\_ssid = "") для возможности связи с ней.

Event#	Time	Src/Dest	Name	Info
#66	0.238438170822	AP_2 --> AP_1	Beacon	WLAN beacon
#66	0.238438170822	AP_2 --> host	Beacon	WLAN beacon
#79	0.264589411509	AP_1 --> AP_2	Beacon	WLAN beacon
#79	0.264589411509	AP_1 --> host	Beacon	WLAN beacon
#92	0.287069108919	host --> AP_1	ProbeReq	WLAN probe request
#92	0.287069108919	host --> AP_2	ProbeReq	WLAN probe request (ch 0)
#106	0.338438170822	AP_2 --> AP_1	Beacon	WLAN beacon
#106	0.338438170822	AP_2 --> host	Beacon	WLAN beacon
#119	0.364589411509	AP_1 --> AP_2	Beacon	WLAN beacon
#119	0.364589411509	AP_1 --> host	Beacon	WLAN beacon
#136	0.438438170822	AP_2 --> AP_1	Beacon	WLAN beacon
#136	0.438438170822	AP_2 --> host	Beacon	WLAN beacon
#149	0.464589411509	AP_1 --> AP_2	Beacon	WLAN beacon
#149	0.464589411509	AP_1 --> host	Beacon	WLAN beacon
#165	0.537069108919	host --> AP_1	ProbeReq	WLAN probe request
#165	0.537069108919	host --> AP_2	ProbeReq	WLAN probe request (ch 1)
#178	0.537161490204	AP_1 --> AP_2	ProbeResp	WLAN probe response
#178	0.537161490204	AP_1 --> host	ProbeResp	WLAN probe response
#189	0.53720987149	host --> AP_1	ACK	WLAN ack 10-10-10-10-10-10
#189	0.53720987149	host --> AP_2	ACK	WLAN ack 10-10-10-10-10-10
#204	0.538438170822	AP_2 --> AP_1	Beacon	WLAN beacon

Рис. 9. Процесс обнаружения клиентом точки доступа AP\_1  
 Fig. 9. Process of AP\_1 access point detection by the client

Этот процесс запускается модулем агента клиента, который настроен на активное сканирование. При сканировании клиент отправляет кадр запроса Probe Request по всем каналам, начиная с нулевого (рис. 9). Он будет последовательно менять частотные каналы, пока не получит ответ на этот запрос. Так как точка доступа AP\_1 настроена на канал номер 1, то клиент в радиоэфир отправит два запроса, прежде чем AP\_1 вышлет ему ответ Probe Response, получение которого хост подтвердит обратной квитанцией ASK. Затем, проверив еще каналы номер 2 и 3, клиент инициирует процесс аутентификации с AP\_1, используя канал номер 1. При успешном завершении этого этапа выполняются аутентификации и ассоциации, включающие ряд шагов (рис. 10).

Когда хост становится ассоциированным с AP\_1, над пиктограммой узла host появляется всплывающее сообщение “Associated with AP”. Клиент остается связанным с AP\_1 до тех пор, пока он находится в пределах диапазона связи, даже если он попадает в диапазон связи AP\_2. При выходе из области действия AP\_1, то есть обнаружив, что на этом канале несколько маячков уже не приняты, модуль агента хоста перезапускает процесс сканирования. На этот раз для получения ответа потребуется уже четыре кадра запроса Probe Request, потому что AP\_2 работает на канале 3. Затем будет выполнен процесс аутентификации и ассоциации, аналогично рассмотренному выше процессу.

Event#	Time	Src/Dest	Name	Info
#466	1.337069108919	host --> AP_1	Auth	WLAN auth
#466	1.337069108919	host --> AP_2	Auth	WLAN auth
#478	1.337113503821	AP_1 --> AP_2	ACK	WLAN ack 90-80-70-60-50-40
#478	1.337113503821	AP_1 --> host	ACK	WLAN ack 90-80-70-60-50-40
#491	1.337527503821	AP_1 --> AP_2	Auth	WLAN auth
#491	1.337527503821	AP_1 --> host	Auth	WLAN auth
#503	1.337571898731	host --> AP_1	ACK	WLAN ack 10-10-10-10-10-10
#503	1.337571898731	host --> AP_2	ACK	WLAN ack 10-10-10-10-10-10
#516	1.338025898731	host --> AP_1	Auth	WLAN auth
#516	1.338025898731	host --> AP_2	Auth	WLAN auth
#528	1.33807029365	AP_1 --> AP_2	ACK	WLAN ack 90-80-70-60-50-40
#528	1.33807029365	AP_1 --> host	ACK	WLAN ack 90-80-70-60-50-40
#543	1.338438170822	AP_2 --> AP_1	Beacon	WLAN beacon
#543	1.338438170822	AP_2 --> host	Beacon	WLAN beacon
#551	1.33848429365	AP_1 --> AP_2	Auth-OK	WLAN auth
#551	1.33848429365	AP_1 --> host	Auth-OK	WLAN auth
#569	1.33852688577	host --> AP_1	ACK	WLAN ack 10-10-10-10-10-10
#569	1.33852688577	host --> AP_2	ACK	WLAN ack 10-10-10-10-10-10
#582	1.339002688577	host --> AP_1	Assoc	WLAN assoc req
#582	1.339002688577	host --> AP_2	Assoc	WLAN assoc req
#594	1.339047083513	AP_1 --> AP_2	ACK	WLAN ack 90-80-70-60-50-40
#594	1.339047083513	AP_1 --> host	ACK	WLAN ack 90-80-70-60-50-40
#607	1.339541083513	AP_1 --> AP_2	AssocResp-OK	WLAN assoc resp
#607	1.339541083513	AP_1 --> host	AssocResp-OK	WLAN assoc resp
#619	1.339589478459	host --> AP_1	ACK	WLAN ack 10-10-10-10-10-10
#619	1.339589478459	host --> AP_2	ACK	WLAN ack 10-10-10-10-10-10
#647	1.364589411509	AP_1 --> AP_2	Beacon	WLAN beacon

Рис. 10. Процесс установления соединения узла host с AP\_1  
 Fig. 10. Process of establishing connection between the host and AP\_1

Отличительной особенностью этого варианта модели сети является то, что в процессе ее функционирования в окне ассоциаций узла host будут правильно отображаться не только MAC адреса точек доступа, но и имена сетей, и номера используемых каналов (рис. 11). Эти результаты получены при условии, что мощность передатчиков всех узлов сети составляет 1 мВт и отображает три состояния узла host: при его подключении к точке доступа AP\_1, при потере связи с этой точкой доступа, а также при переподключении этого узла к точке доступа AP\_2.

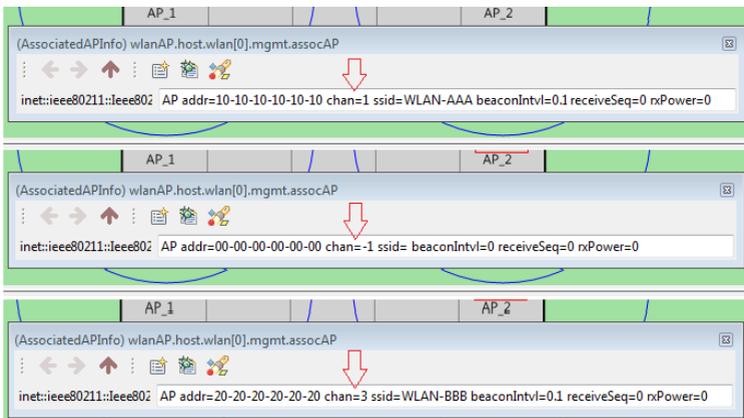


Рис. 11. Изменение вида окна ассоциаций узла host  
 Fig. 11. Changing the host association window

Аналогичные исследования по ассоциации мобильного узла host с доступными точками доступа могут быть проведены и при любых заданных мощностях передатчиков структурных элементов Wi-Fi сети. Например:

```
[Config step3]
description="Real model - 2mW"
extends = step1, step2

[Config step4]
description=" Real model - AP=2mW; host=1mW"
extends = step1, step2
*.host.wlan[*].radio.transmitter.power = 1.0mW
```

В частности, при  $P_{AP}=2mW$  и  $P_{host}=1mW$  узел host, войдя в зону покрытия AP\_2, будет устойчиво получать ее маячки, определять SSID сети и MAC адрес AP\_2, но установить ассоциацию, в отличие от рис. 8, сможет только после входа в область устойчивой радиосвязи с AP\_2 (рис. 12).

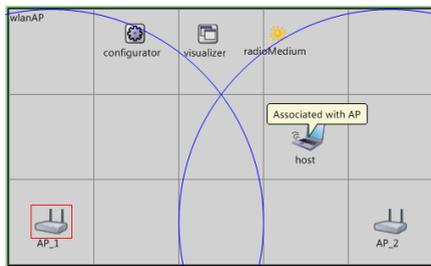


Рис. 12. Ассоциация узла host с AP\_2 (при  $P_{AP}=2mW$  и  $P_{host}=1mW$ )  
 Fig. 12. Host association with AP\_2 (with  $P_{AP}=2mW$  and  $P_{host}=1mW$ )

**Выводы.** Предложен подход к разработке в среде OMNeT++ INET прототипной имитационной модели функционирования инфраструктурного режима работы Wi-Fi сети, который позволяет проводить подробный анализ функционирования таких сетей, а также строить и анализировать временные диаграммы взаимодействия всех элементов сети (рис. 13).

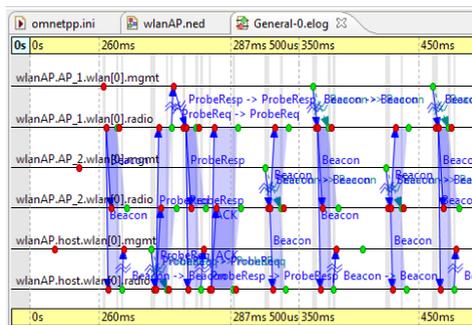


Рис. 13. Временная диаграмма взаимодействия элементов Wi-Fi сети  
 Fig. 13. Temporal diagram of interaction of Wi-Fi network elements

Разработанная модель может быть использована как базовая для формирования более сложных моделей, имеющих произвольное количество мобильных клиентов, а также позволяющих определять необходимое количество точек доступа и места размещения для обеспечения полноценно-го покрытия мониторинговой области лесной территории.

### Библиографический список

*Вагизов М.Р.* Потенциал использования инфокоммуникационных технологий на основе RFID-меток в лесной сфере // Цифровые технологии в лесном секторе: матер. Всерос. науч.-техн. конф. / СПбГЛТУ имени С.М. Кирова; СПбГПУ Петра Великого, 2020. С. 26–29.

*Заяц А.М., Хабаров С.П.* Исследование алгоритма работы распределенной системы мониторинга лесных территорий. // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2019. Вып. 229. С. 243–254.

*Заяц А.М., Хабаров С.П.* Построение моделей беспроводных сетей с учетом энергопотребления и мобильности ее узлов // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2020. Вып. 232. С. 252–264. DOI: 10.21266/2079-4304.2020.232.252-264

Парламентская газета, 26.04.2019. URL: <https://www.pnp.ru/economics/kabin-planiruet-vvesti-markirovku-cennykh-porod-derevev-elektronnyimi-metkami.html/> (дата обращения: 10.11.2020).

Пресс-релиз Ростеха, 7.11.2018, Москва. URL: <https://rostec.ru/media/press-release/rostekh-zashchitit-tsennye-porody-derevev-ot-nezakonnoy-vyrubki/> (дата обращения: 10.11.2020).

*Санников С.П., Герц Э.Ф.* Метод мониторинга незаконных рубок деревьев с использованием RFID-устройств и WSN-сети // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2017. Вып. 219. С. 173–183.

*Санников С.П., Побединский В.В., Бородулин И.В., Побединский А.А.* Метод радиочастотного мониторинга лесного фонда // Лесной вестник. Forestry Bulletin. 2017. Т. 21. № 2. С. 45–54.

*Хабаров С.П., Думов М.И.* Анализ работы протокола CSMA/CA в среде OMNET++ с использованием INET framework // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2020. Т. 20. № 5. С. 692–700. DOI: 10.17586/2226-1494-2020-5-692-700.

*Хабаров С.П., Шнекторов А.Г.* Проектирование и исследование распределенных судовых систем управления техническими средствами в среде SimInTech // Морские интеллектуальные технологии. 2019. №4 (36) Т.2. С. 181–188.

*Dumov M.I., Khabarov S.P.* Modeling of wireless networks in OMNET ++ environment involving INET framework // Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics. 2019. Vol. 19, no. 6. P. 1151–1161. DOI: 10.17586/2226-1494-2019-6-1151-1161.

*Gianni Picchi.* Marking Standing Trees with RFID Tags // Forests. 2020. No. 11(2). P. 150. URL: <https://www.mdpi.com/1999-4907/11/2/150> (дата обращения: 10.11.2020).

*Valentini R., Belelli Marchesini L., Gianelle D., Sala G., Yaroslavtsev A., Vasevnev V.I., Castaldi S.* New tree monitoring systems: from Industry 4.0 to Nature 4.0 // Annals of Silvicultural Research. 2019. No. 43 (2). P. 84–88.

## References

Gianni Picchi. Marking Standing Trees with RFID Tags. *Forests*, 2020, no. 11(2), p. 150. URL: <https://www.mdpi.com/1999-4907/11/2/150> (data obrashcheniya: 10.11.2020).

Valentini R., Belelli Marchesini L., Gianelle D., Sala G., Yaroslavtsev A., Vasenev V.I., Castaldi S. New tree monitoring systems: from Industry 4.0 to Nature 4.0. *Annals of Silvicultural Research*, 2019, no. 43 (2), pp. 84–88.

Sannikov S.P., Gerc E.F. Metod monitoringa nezakannykh rubok de-rev'ev s ispol'zovaniem RFID-ustrojstv i WSN-seti. *Izvestiya Sankt-Peterburgskoj lesotekhnicheskoy akademii*, 2017, iss. 219, pp. 173–183. (In Russ.)

Vagizov M.R. Potencial ispol'zovaniya infokommunikacionnykh tekhnologiy na osnove RFID-metok v lesnoy sfere. *Cifrovye tekhnologii v lesnom sektore: mater. Vseros. nauch.-tekhn. konf. / SPbGLTU imeni S.M. Kirova; SPbGPU Petra Velikogo*, 2020, pp. 26–29. (In Russ.)

Zayac A.M., Habarov S.P. Issledovanie algoritma raboty raspredelennoy sistemy monitoringa lesnykh territorij. *Izvestiya Sankt-Peterburgskoj lesotekhnicheskoy akademii*, 2019, iss. 229, pp. 243–254. (In Russ.)

Sannikov S.P., Pobedinskij V.V., Borodulin I.V., Pobedinskij A.A. Metod radiochastotnogo monitoringa lesnogo fonda. *Lesnoj vestnik. Forestry Bulletin*, 2017, vol. 21, no. 2, pp. 45–54. (In Russ.)

Zayac A.M., Habarov S.P. Postroenie modelej besprovodnykh setej s uchedom energopotrebleniya i mobil'nosti ee uzlov. *Izvestiya Sankt-Peterburgskoj lesotekhnicheskoy akademii*, 2020, iss. 232, pp. 252–264. DOI: 10.21266/2079-4304.2020.232.252-264. (In Russ.)

Dumov M.I., Khabarov S.P. Modeling of wireless networks in OMNeT ++ environment involving INET framework. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2019, vol. 19, no. 6, pp. 1151–1161. DOI: 10.17586/2226-1494-2019-19-6-1151-1161. (In Russ.)

Habarov S.P., Dumov M.I. Analiz raboty protokola CSMA/CA v srede OMNET++ s ispol'zovaniem INET framework. *Nauchno-tekhnicheskij vestnik informacionnykh tekhnologij, mekhaniki i optiki*, 2020, vol. 20, no. 5, pp. 692–700. DOI: 10.17586/2226-1494-2020-20-5-692-700. (In Russ.)

Habarov S.P., Shpektorov A.G. Proektirovanie i issledovanie ras-predelennykh sudovykh sistem upravleniya tekhnicheskimi sredstvami v sre-de SimInTech. *Morskije intellektual'nye tekhnologii*, 2019, no. 4 (36), vol. 2, pp. 181–188. (In Russ.)

Press-reviz Rostekha, 07.11.2018, Moscow. URL: <https://rostec.ru/media/pressrele-ase/rostekh-zashchitit-tsennye-porody-derevev-ot-nezakonnoy-vyrubki/> (data obrashcheniya: 10.11.2020). (In Russ.)

Parlamentskaya gazeta, 26.04.2019. URL: <https://www.pnp.ru/economics/kabmi-n-planiruet-vvesti-markirovku-cennykh-porod-derevev-elektronnymi-metkami.html/> (data obrashcheniya: 10.11.2020). (In Russ.)

*Материал поступил в редакцию 09.02.2021*

---

**Зяц А.М., Хабаров С.П.** Моделирование в среде OMNET++ процессов подключения в Wi-Fi сетях // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2021. Вып. 237. С. 272–287. DOI: 10.21266/2079-4304.2021.237.272-287

Предложен подход к разработке в среде OMNeT++ INET простейшей имитационной модели инфраструктурного режима функционирования Wi-Fi сети, который позволяет проводить подробный анализ функционирования таких сетей, а также строить и анализировать временные диаграммы взаимодействия всех элементов сети. Разработанную модель можно использовать как базовую для формирования более сложных моделей с произвольным числом мобильных клиентов, позволяющая определять необходимое количество точек доступа и мест их размещения для обеспечения полноценного покрытия зоны мониторинга лесной территории.

Ключевые слова: распределенные системы, беспроводные сети, сетевое программирование.

**Zayats A.M., Khabarov S.P.** Modeling in the OMNET ++ environment of connection processes in Wi-Fi networks. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotekhniceskoj Akademii*, 2021, iss. 237, pp. 272–287 (in Russian with English summary). DOI: 10.21266/2079-4304.2021.237.272-287

An approach to the development in the OMNeT ++ INET environment of the simplest simulation model of the infrastructure mode of Wi-Fi network operation is proposed, which allows a detailed analysis of the functioning of such networks, as well as to build and analyze the time diagram of the interaction of all network elements. The developed model can be used as a base for the formation of more complex models with an arbitrary number of mobile clients, allowing you to determine the required number of access points and their locations to ensure full coverage of the monitoring area of the forest area.

Keywords: distributed systems, wireless networks, network programming.

---

**ЗАЯЦ Анатолий Моисеевич** – профессор кафедры информационных систем и технологий Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова, кандидат технических наук.

194021, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: zamfta@yandex.ru

**ZAYATS Anatoliy M.** – PhD (Technical), Professor of department of Information Systems and Technology of St.Petersburg State Forest Technical University.

194021. Institute per. 5. St. Petersburg. Russia. E-mail: zamfta@yandex.ru

**ХАБАРОВ Сергей Петрович** – доцент кафедры информационных систем и технологий Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова, кандидат технических наук.

194021, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: Serg.Habarov@mail.ru

**KHABAROV Sergey P.** – PhD (Technical), Associate Professor, Associate Professor of department of Information Systems and Technology of St. Petersburg State Forest Technical University.

194021. Institute per. 5. St. Petersburg. Russia. E-mail: Serg.Habarov@mail.ru