

# Процедуры формирования и передачи сигналов позиционирования в сетях стандарта IEEE 802.11az

Е. С. Багаев

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций  
им. проф. М.А. Бонч-Бруевича

bagaeve13@yandex.ru

**Аннотация.** В статье рассматриваются процедуры формирования и передачи сигналов позиционирования в сетях стандарта IEEE 802.11az. Описывается модель, реализующая алгоритмы передачи и обработки сигналов для точного определения местоположения (ОМП) устройств в беспроводных локальных сетях (БЛС) Wi-Fi. Анализируются методы формирования сигналов и их передачи между пользовательскими устройствами STA (Station) и точками доступа AP (Access Point) с известными местоположениями.

**Ключевые слова:** беспроводные локальные сети, позиционирование, стандарт 802.11az

## I. ВВЕДЕНИЕ

Стандарт 802.11az [1], обычно называемый системой позиционирования следующего поколения NGP (Next Generation Positioning), позволяет станции STA определять свое местоположение (МП) относительно других станций. Для проведения дальномерных измерений стандарт 802.11az поддерживает два формата пакетов передачи данных на физическом уровне PHY (Physical layer) для протокола PPDU (Protocol Data Unit). Такие пакеты NDP (Null Data Packet) называются высокоэффективными и обозначаются как HE (High Efficiency):

- высокоэффективный пакет NDP (HE NDP);
- высокоэффективный пакет NDP с переключением по триггеру (HE Trigger Based NDP).

Формат пакета HE NDP для дальномерных измерений приведен на рис. 1. Пакет NDP представляет собой тип пакета, который используется в беспроводных локальных сетях (БЛС). NDP не содержат данных в своей полезной нагрузке, но при этом используются для различных целей, такие как калибровка, измерение качества канала и позиционирование [2].

HE NDP и HE TB NDP являются аналогами пакета зондирования HE sounding NDP и пакета передачи обратной информации после зондирования HE TB NDP feedback PPDU, определенных в стандарте 802.11ax [3][2].

Пакет HE NDP использует ту же структуру, что и высокоэффективный однопользовательский пакет данных физического уровня HE SU PPDU [1] (High

Efficiency Single User Physical Layer Protocol Data Unit), используемый для передачи данных одному пользователю в стандарте IEEE 802.11ax (Wi-Fi 6) [3]. Отличие пакета HE NDP от пакета HE SU PPDU заключается в отсутствии поля данных в структуре пакета. Поля наследуемого формата L-STF (Legacy Short Training Field) и L-LTF (Legacy Long Training Field) в пакете HE NDP идентичны полям L-STF и L-LTF в пакете данных физического уровня протокола высокой эффективности для одного пользователя HE SU PPDU. Поле наследуемого формата L-SIG (Legacy Signal Field), дублирующее поле наследуемого формата RL-SIG (Repeated Legacy Signal Field) и поле сигнала HE-SIG-A (High Efficiency Signal A Field) имеют те же битовые назначения и определения, что и подполя в HE SU PPDU, если не указаны другие уточняющие условия.

Пакет HE NDP для дальномерных измерений поддерживает позиционирование одного или нескольких пользователей с использованием необязательной защищенной последовательности HE-LTF (HE Long Training Field). При наличии нескольких пользователей в сети допускается использование только защищенных символов HE-LTF. При передаче одному или нескольким пользователям в структуре пакета HE NDP возможно наличие нескольких символов HE-LTF для реализации режима накопления. За счет этого возможно добиться увеличения точности при оценке расстояния.

Задачей настоящей работы является описание процедур генерации высокоэффективных пакетов HE NDP для задач позиционирования в сетях 802.11az.

В разделе II приводится процедура формирования сигналов и структура пакета для дальномерных измерений. Описываются параметры, определяющие структуру и назначение пакетов. Выводы приводятся в разделе III.

## II. ПРОЦЕДУРА ФОРМИРОВАНИЯ СИГНАЛОВ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ ДЛЯ ДАЛЬНОМЕРНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Для генерации и передачи высокоэффективных пакетов в имитационной модели (ИМ) реализуется цепочка процедур, результатом выполнения которых является передача последовательности пакетов от AP к STA по многоручевому каналу [4].

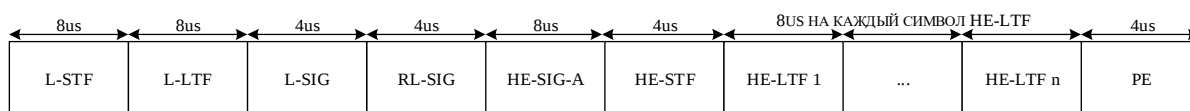


Рис. 1. Структура пакета HE NDP

#### А. Параметризация объектов для генерации NDP

На первом этапе генерации NDP происходит параметризация передачи пакетов HE NDP для дальномерных измерений в соответствии со стандартом IEEE 802.11az. Конфигурируемые параметры приведены далее [5].

- **ChannelBandwidth** – параметр, определяющий полосу пропускания канала для передачи PPDU. Может принимать значения 20, 40, 80 или 160 МГц;
- **InactiveSubchannels** – с помощью этого параметра устанавливаются неактивные или т.н. «проколотые» (punctured) каналы в создаваемой беспроводной сети. В условиях изменяющейся среды, где доступные частотные ресурсы могут быть ограничены или подвержены интерференции, использование "punctured" каналов позволяет сети динамически перераспределять частотные поддиапазоны. Это достигается путем исключения тех поддиапазонов, которые в данный момент времени испытывают высокий уровень помех или не соответствуют текущим требованиям качества обслуживания QoS (Quality of Service) [6];
- **User** – для каждого пользователя указываются определенные свойства защищенной последовательности HE-LTF. Создается массив, в котором каждый элемент отвечает за определенное свойство, например – количество пространственно-временных потоков и количество передаваемых последовательностей HE-LTF;
- **Secure HE-LTF** – определение возможности запуска генерации защищенной последовательности HE-LTF в соответствии со стандартом IEEE 802.11az. Для этого необходимо установить значение для этого параметра «true». В случае, если значение параметра равно «false», то защищенная последовательность генерируется в соответствии со стандартом IEEE 802.11ah. Выбор стандарта, в соответствии с которым будет происходить генерация HE-LTF, возможен только при условии передачи единственному пользователю. Если же в сети присутствует несколько пользователей, то по умолчанию этот параметр принимает значение «true»;
- **NumTransmitAntennas** – параметр, с помощью которого устанавливается количество передающих антенн на AP;
- **PreHECyclicShifts** – значение циклического сдвига последовательности HE. Этот параметр активен только случае, если в ИМ указано значение количества передающих антенн >8. Значение циклического сдвига устанавливается в наносекундах;
- **PreHESpatialMapping** – управление возможностью применения пространственного отображения к части PPDU, предшествующей HE-STF. Если значение параметра «true», то пространственное отображение будет

применяться к предшествующей HE-STF части так же, как к первому символу поля HE-LTF;

- **GuardInterval** – защитный интервал, может принимать значение 0,8 мкс или 1,6 мкс. Защитный интервал предназначен для предотвращения помех, которые возникают из-за переотражений при распространении сигнала по каналу.
- **UplinkIndication** – направление передачи блока данных протокола физического уровня PPDU. Если для параметра установлено значение «true», то данные передаются по направлению вверх (Uplink), если «false» - вниз (Downlink);
- **BSSColor** – цветовой идентификатора BSS Coloring, являющимся отличительным признаком для устройств в сети;
- **TXOPDuration** – интервал времени, в течение которого STA получает разрешение для передачи, при этом STA получает возможность передавать несколько пакетов друг за другом;
- **HighDoppler** – компенсация доплеровского сдвига;
- **MidamblePeriodicity** – периодичность промежуточной последовательности поля HE-Data. Периодичность устанавливается равной длительности 10 или 20 OFDM символов; этот параметр находится только в поле HE-SIG-A, так как HE NDP не содержит поля данных;
- **STBC** – возможность применения пространственно-временного кодирования; этот параметр находится только в поле HE-SIG-A, так как HE NDP не содержит поля данных;
- **MCS** – схема модуляции и кодирования; этот параметр находится только в поле HE-SIG-A, так как HE NDP не содержит поля данных;
- **DCM** – определение возможности модуляции на нескольких поднесущих;
- **ChannelCoding** – тип кодирования, применяющегося в сети; возможно выбрать двоичное сверточное кодирование BCC (Binary Convolution Coding) либо код с малой плотностью проверок на четность LDPC (Low Density Parity Check).

Далее рассмотрим порядок формирования рандомизированных символов защищенной последовательности HE-LTF согласно стандарту 802.11az [1]. Рандомизация при формировании символов обеспечивает защиту от интерференции, например – если две AP передают данные одновременно, то две последовательности будут слабо коррелированы, что позволит приемнику выделить целевой сигнал от одной из AP.

1. В пределах полосы пропускания, установленной с помощью параметра **ChannelBandwidth** формируется N-е число защищенных символов HE-LTF.

2. Для каждой частотной составляющей применяется оконная функция. Оконная функция в частотной области может быть прямоугольным окном или окном с плоской вершиной. Прямоугольное окно сохраняет амплитуду

сигнала без изменений, а окно с плоской вершиной снижает уровень боковых лепестков спектра, улучшая избирательность по частоте.

3. Каждая частотная составляющая перемножается на матрицу  $P_{HE-LTF}$ . Эта матрица является частью преамбулы, которая передается перед основной частью данных и используется для последующей оценки канала и синхронизации. Применение матрицы обусловлено необходимостью обеспечения ортогональности между пространственными потоками для систем с поддержкой MIMO (Multiple-Input And Multiple-Output).

4. Для каждого пространственного потока применяется псевдослучайный фазовый сдвиг, который снижает корреляцию между потоками.

5. Для каждого пространственно-временного потока применяется нулевое циклическое смещение задержки CSD (Cyclic Shift Diversity). Циклический сдвиг применяется для улучшения производительности передачи данных в многопользовательских сценариях за счет уменьшения интерференции между пространственно-временными потоками. В данном случае применение нулевой циклической задержки эквивалентно ее отсутствию, что обусловлено минимальной интерференцией [7].

6. Для рассматриваемой процедуры генерации не предусмотрено пространственное отображение, т.е.  $Q$ -матрица здесь является блочной единичной матрицей и имеет вид

$$Q = I_{N_{STS} \times N_{STS}}, \quad (1)$$

где  $N_{STS}$  – количество пространственно-временных потоков. Это означает, что каждый пространственно-временной поток передается между соответствующими антеннами. Использование единичной матрицы упрощает обработку сигнала на стороне приемника, так как не требуется декодирование сложных пространственных преобразований.

7. Вычисляется обратное дискретное преобразование Фурье (ОДПФ). Размер ОДПФ соответствует количеству поднесущих, определенных параметром ChannelBandwidth

8. К последовательности добавляется значение защитного интервала GI (Guard Interval). Длина защитного интервала выбирается из двух значений – 0,8 или 1,6 мкс. Защитный интервал необходим для создания т.н. «буфера» между символами. Это обусловлено тем, что в беспроводных сетях сигнал может приходиться с задержками из-за многолучевого распространения. При этом, если суммарная задержка между принятыми символами будут превышать длину защитного интервала, то может возникнуть наложение символов, что приведет к возникновению ошибок при декодировании [8].

9. Преобразование полученного комплексного сигнала, связанного с каждой из передающих цепей AP, в радиочастотный сигнал с частотой, соответствующей центральной частоте выбранного канала. Это завершающий этап формирования сигнала перед его передачей в эфир, состоящий из нескольких ключевых шагов. После цифровой обработки сигнал представляет из себя смесь синфазной и квадратурной компоненты, и для передачи по радиоканалу он должен пройти процесс переноса на центральную частоту, фильтрацию, тракт усиления и непосредственно передачу через антенну.

Важным этапом при генерации защищенной последовательности является определение начального и конечного индекса в пакете. Для этого используются временные константы, зависящие от параметров канала, по которому передается сигнал. Для каждого из полей, представленных на рис. 1, рассчитывается количество отсчетов:

$$L = (T \times B), \quad (2)$$

где  $L$  – длина поля в отсчетах;  $T$  – длительность поля в нс;  $B$  – ширина канала в ГГц. Для канала 80 МГц и длительности поля 1.6 мкс длина поля будет равна

$$L = (1600 \times 0,08) = 128 \text{ отсчетов.}$$

Рассчитанные индексы позволяют определить из общего массива данных конкретные поля (например – преамбулу, заголовок, данные). Также, поскольку защищенные последовательности HE-LTF используются для оценки характеристик канала, при некорректном считывании индексов оценка канала будет произведена неверно. В сценариях передачи сигнала от AP нескольким пользователям индексы полей позволяют разделить данные для каждого пользователя. Это достигается путем того, что индексы возвращаются в виде матрицы, в которой каждой строке соответствует свой пользователь.

#### *В. Формирование сигнала для передачи в БЛС на основе стандарта 802.11az*

Следующим этапом является непосредственно генерация сигнала в БЛС на основе стандарта 802.11az. На этом этапе определяются значения для набора параметров, которые в дальнейшем определяют форму, вид, и длительность сигнала [5].

Для генерации сигнала необходимо учитывать значения параметров, а именно – ширину канала, число передающих антенн, количество пространственных потоков для STA, и наличие сгенерированной защищенной HE-LTF последовательности.

Первый параметр NumPackets устанавливает количество сгенерированных пакетов для числа пользователей, указанных ранее. Возможность генерации нескольких пакетов сразу обусловлена возможной необходимостью проведения оценки устойчивости системы, реализации многопользовательских сценариев, тестирования алгоритмов синхронизации и декодирования на приемнике.

Второй параметр IdleTime позволяет контролировать длину периода простоя после каждого сгенерированного пакета, что может быть важно для оптимизации передачи данных и управления ресурсами в беспроводных системах связи. Значение длины простоя должно быть больше чем 2 мкс, либо равной 0. Это требование определено стандартом IEEE 802.11.

Третий параметр WindowTransitionTime указывает длину переходного окна в секундах, которое применяется к сигналу. Переходное окно используется для плавного изменения амплитуды сигнала на границах пакета, что помогает уменьшить спектральные искажения и улучшить качество передачи. Стоит отметить, что оконная функция не применяется к защищенным последовательностям HE-LTF, поскольку эти последовательности генерируются случайно.

Таким образом, параметризация на этом этапе в конечном итоге позволяет учесть особенности передачи

сигнала при имитировании реальных условий передачи, улучшить спектральные характеристики и провести тестирование системы при различных сценариях.

Далее на рис. 2 приведен график сгенерированного сигнала при наличии в сети одной STA. На рис. 3 приведен график сгенерированного сигнала для первого пользователя при двух STA в сети. На рис. 4 приведен график общего передаваемого сигнала.

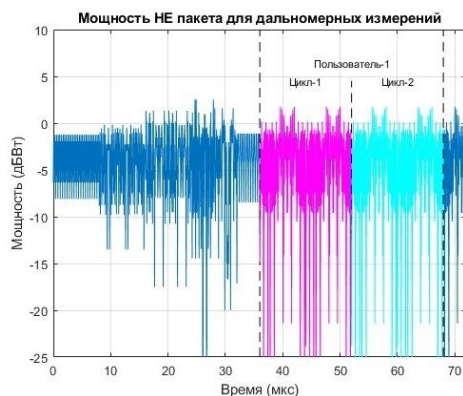


Рис. 2. Осциллограмма сигнала для однопользовательской конфигурации

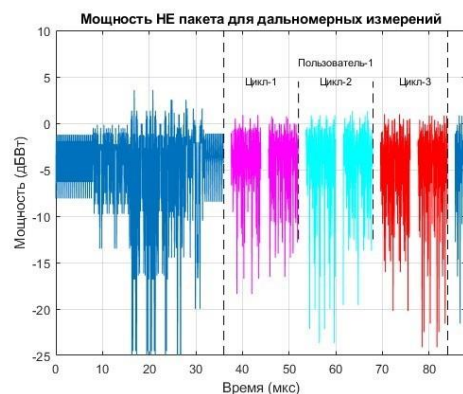


Рис. 3. Осциллограмма сигнала первого пользователя при наличии двух пользователей в сети

Как видно из рис. 3, при наличии нескольких пользователей в сети, в сигнал дополнительно добавляется защищенная последовательность, которая необходима для правильной идентификации на приемной стороне. Помимо этого, в конце каждой последовательности добавляется защитный интервал, равный 1.6 мкс, которого нет при генерации в однопользовательском сценарии, как это показано на рис. 2.

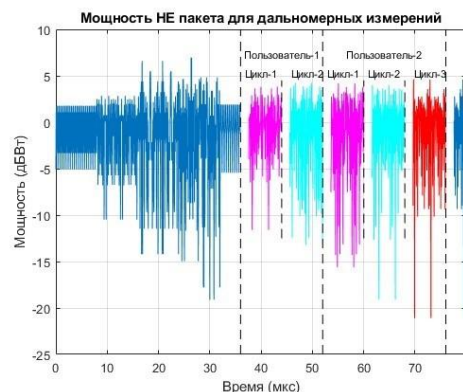


Рис. 4. Осциллограмма суммарного сигнала, предназначенного для передачи в сценарии с двумя пользователями

На рисунках показано, что последовательности формируются в виде циклов. Каждый цикл в сгенерированном пакете предоставляет дополнительные данные для усреднения результатов измерений. Это снижает влияние шумов и многолучевого распространения. Множественные повторения позволяют использовать методы когерентного накопления, улучшая качество оценки канала.

### III. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье были рассмотрены процедуры формирования и передачи сигналов позиционирования в сетях стандарта IEEE 802.11az. Рассмотрена структура высокоэффективного пакета HE NDP, приведены параметры объектов и последовательность генерации защищенных HE-LTF символов, а также приведены осциллограммы сигналов для однопользовательского и многопользовательского сценариев. Проанализированы характеристики, влияющие на длину последовательностей. В дальнейших работах следует рассмотреть модели каналов, по которым передаются высокоэффективные пакеты HE NDP, проанализировать алгоритмы приема и обработки сигналов для позиционирования в БЛС 802.11az.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] IEEE Approved Draft Standard for Information technology – Telecommunications and information exchange between systems Local and metropolitan area networks – Specific requirements Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications - Amendment 4: Enhancements for positioning. IEEE P802.11az/D7.0, 2022 [Электронный ресурс]. URL: <https://standards.ieee.org/ieee/802.11az/7226/> (Дата обращения 15.02.2025).
- [2] Wenjun G., Zhimin Y., Dong X. Null Data Frame: A Double-Edged Sword in IEEE 802.11 WLANs// IEEE Transactions On Parallel And Distributed Systems. 2010, Vol. 21, № 7.
- [3] 802.11ax-2021. Telecommunications and Information Exchange between Systems Local and Metropolitan Area Networks--Specific Requirements Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) S. IEEE, 2021.
- [4] Фокин Г.А. Достижение дециметровой точности позиционирования в гетерогенных сетях NR-Wi-Fi // Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании: Сб. науч. статей XII Междун. науч.-техн. и науч.-метод. конференции. 2023. Т. 4, С. 542-547.
- [5] 802.11az Waveform Generation. MathWorks. [Электронный ресурс]. URL: [https://www.mathworks.com/help/wlan/ug/802\\_11az\\_waveform\\_generation.html](https://www.mathworks.com/help/wlan/ug/802_11az_waveform_generation.html) (Дата обращения 15.02.2025).
- [6] Sareddeen H., Mansour M., Chehab A. Large MIMO Detection Schemes Based on Channel Puncturing: Performance and Complexity Analysis// IEEE Transactions on Communications, 2018, Vol. 66, №. 6.
- [7] Camara A., Hoefel R. On the Performance of IEEE 802.11n Cyclic Shift Diversity Scheme for 802.11a/g Legacy Compatibility// IEEE 73rd Vehicular Technology Conference, 2011, pp 1-5
- [8] Steedam H., Moeneclaey M. Different Guard Interval Techniques for OFDM: Performance Comparison // Lecture Notes Electrical Engineering, 2007, Vol 1.