

Модели радиоканала для 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 модели радиоканала, используемые для процедуры определения местоположения (ОМП) пользовательских устройств STA (Station) в беспроводных локальных сетях (БЛС) стандарта IEEE 802.11az. Описываются методы моделирования радиоканала, учитывающие особенности многолучевого распространения радиоволн (РРВ). Приводятся основные параметры радиоканала, с помощью которых возможно провести оценку местоположения STA при различных условиях распространения сигнала и характеристиках окружающей среды.

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

I. ВВЕДЕНИЕ

Стандарт IEEE 802.11az расширяет возможности точного измерения временных параметров, определяемого по стандарту IEEE 802.11-2016. К основным применениям систем позиционирования следующего поколения NGP (Next Generation Positioning), к которым относится стандарт 802.11az, чаще всего причисляют [1], [2][3]:

- точное (менее 1 метра) ОМП внутри помещений;
- возможность развертывания самонастраивающихся БЛС для простого и быстрого функционирования устройств с функцией автоматической подстройки частоты AFC (Automatic Frequency Control);
- обеспечение аутентифицированного и конфиденциального ОМП, что открывает возможность к использованию услуг, предъявляющих высокие требования к безопасности;
- подключение STA к AP по принципу обеспечения оптимизации подключения и предоставления пользователю наилучшего соединения;
- обеспечение локализации в сетях с высокой плотностью устройств.

Как видно из списка услуг, предоставляемых стандартом 802.11az, устройства должны работать в различных условиях. При этом эти условия влияют на передачу, прием и распространение сигнала. Для учета условий РРВ существуют модели каналов, разработанные целевыми группами TG (Task Group) для набора стандартов беспроводной связи IEEE 802.11az.

Далее в статье приведены основные модели канала, используемые в БЛС стандарта 802.11az, приведены основные параметры этих каналов, их особенности и

отличия. Рассмотрены характеристики, позволяющие применять модели в условиях многолучевого распространения, а также при наличии нескольких STA в сети.

II. МОДЕЛИ КАНАЛА В БЛС СТАНДАРТА IEEE 802.11AZ

В БЛС стандарта 802.11az при определении местоположения устройства важно учитывать ряд характеристик и условий распространения сигнала [4]. Это связано с тем, что окружающая среда оказывает значительное влияние на уровень принимаемого сигнала, время прихода на приемное устройство, количество отраженных копий сигнала и т. д.

Для учета параметров, целевыми группами TG были разработаны модели каналов, отвечающие требованиям различных стандартов. При этом модель канала TGax [5], применяемая в сетях 802.11az, основана на моделях канала TGn [6] и TGac [7].

A. Модель канала TGn

В 2009 году был принят стандарт 802.11n, который позволял достигать пропускной способности в 600 Мб/с. Это достигалось благодаря использованию инновационных на тот момент технологий, среди которых можно выделить технологию множественного входа и множественного выхода MIMO (Multiple-Input And Multiple-Output). Для БЛС, использующих эту технологию, была разработана специальная модель канала TGn. Эта модель может быть использована как для диапазона 2 ГГц, так и для 5 ГГц [6]. Это обосновано тем, что в дополнение к теоретическим расчетам использовались экспериментальные данные, полученные в ходе многих исследований. При моделировании систем MIMO авторы следуют подходу, определенному в [8]. Согласно этому подходу, канальная матрица H может быть представлена суммой двух матриц, для случаев прямой и непрямой видимости, LoS (Line of Sight) и NLoS (Non Line of Sight) соответственно [6]:

$$H = \sqrt{P} \left(\sqrt{\frac{K}{K+1}} \begin{bmatrix} e^{j\varphi_{11}} & \dots & e^{j\varphi_{1j}} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ e^{j\varphi_{i1}} & \dots & e^{j\varphi_{ij}} \end{bmatrix} + \dots \right. \\ \left. \dots + \sqrt{\frac{1}{K+1}} \begin{bmatrix} X_{11} & \dots & X_{1j} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ X_{i1} & \dots & X_{ij} \end{bmatrix} \right), \quad (1)$$

где X_{ij} – коррелированные случайные величины с нулевым средним значением, единичной дисперсией и комплексным гауссовским распределением, представляющие коэффициенты матрицы H_V , которая описывает переменную часть канала (NLoS); $e^{j\varphi_{ij}}$ – элементы матрицы H_F , которая отвечает за постоянную

часть канала (LoS); K – коэффициент Райса, который описывает соотношение между мощностями прямого и отраженного сигналов; P – мощность каждого импульсного отклика, которая включает в себя как фиксированную мощность LoS, так и переменную мощность NLoS.

Модель канала TGn использует кластерный подход, впервые представленный в [8]. При таком подходе многолучевое распространение в канале представлено группами (кластерами) лучей с экспоненциальным затуханием мощности:

$$\overline{\beta_{kl}^2} = \overline{\beta^2(0,0)} e^{-\frac{T_l}{T}} e^{-\frac{\tau_{kl}}{\gamma}} \quad (2)$$

где $\overline{\beta^2(0,0)}$ – средняя мощность первого пришедшего кластера, T_l – время прихода кластера l ; τ_{kl} – время прибытия кластера с номером k в пределах кластера l относительно T_l ; T и γ – параметры, определяющие затухание уровня сигнала на межкластерном и внутрикластерном уровнях, соответственно.

Каждый кластер при описанном подходе характеризуется 3 параметрами – задержкой прихода, среднеквадратическим отклонением задержки и количеством кластеров, табл. 1.

ТАБЛИЦА 1. ПАРАМЕТРЫ МОДЕЛИ КАНАЛА TGN ДЛЯ УСЛОВИЙ LoS и NLoS

Модель	Условие видимости	K (дБ) LoS/NLoS	СКО задержки, нс	Кол-во кластеров
A	LOS/NLOS	0/-	0	1
B	LOS/NLOS	0/-	15	2
C	LOS/NLOS	0/-	30	2
D	LOS/NLOS	3/-	50	3
E	LOS/NLOS	6/-	100	4
F	LOS/NLOS	6/-	150	6

Модели из табл. 1 отличаются друг от друга по параметрам окружения. Так, модель A – модель с равномерными замиранием; модель B-C – малые офисы/жилые помещения; модель D-F – крупные открытые пространства.

Помимо кластерной структуры и временных параметров, характеристики модели включают в себя угловые параметры, такие как угол прибытия сигнала на приемную антенну AoA (Angle of Arrival) и угол ухода сигнала с передающей антенны AoD (Angle of Departure), угловой разброс AS (Angular Spread) [6]. Угловой разброс – это параметр, описывающий меру того, насколько сигнал рассеян в пространстве. Причиной этого рассеяния является многолучевое распространение сигнала. Чем больше угловой разброс AS, тем больше путей прихода сигнала на STA. В некоторых случаях большое количество путей прихода может быть полезно, например – для сетей, в которых реализованы MIMO системы. Для каждой модели, представленной в табл. 1, в [6] приведены свои значения угловых параметров. Угловые параметры в модели канала TGn обеспечивают пространственное распределение сигналов, расчет корреляционных свойств MIMO-каналов, оптимизацию алгоритмов обработки сигналов.

В. Модель канала TGac

В модели канала TGn была предложена комплексная модель широкополосного канала MIMO, с поддержкой

канала с шириной 40 МГц и 4 антеннами. При разработке модели TGac была поставлена цель по увеличению пропускной способности до 1 Гб/с за счет применения одной или нескольких технологий из списка [7]:

- использование MIMO с порядком $>4 \times 4$;
- использование увеличенной полосы пропускания >40 МГц;
- использование многопользовательского MIMO с числом антенн >4 ;
- использование технологии множественного доступа с ортогональным частотным разделением OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access).

Далее приведем основные отличия модели TGac от TGn. В модели TGn интервал между элементами профиля задержки мощности PDP (Power Delay Profile) для полосы в 40 МГц составлял 10 нс [6]. Поскольку в модели TGac полоса пропускания может принимать значения до 1,28 ГГц, то интервал между PDP в этой модели становится намного меньше. Для 80 МГц PDP равен 5 нс, для 160 – 2,5 нс, для 1,28 ГГц – 0,3125 нс. Уменьшение интервала между PDP с ростом полосы пропускания обусловлено мелкомасштабными задержками, возникающими при многолучевом распространении сигнала.

Также, для поддержки MU-MIMO систем были введены изменения, касающиеся углов AoA и AoD. Поскольку в системах MU-MIMO передача ведется нескольким STA, для поддержания одновременной передачи от AP к STA используются равномерно распределенные случайные смещения к углам кластеров. В системах MU-MIMO необходимо обеспечить ортогональность каналов, что обеспечивается разными AoA и AoD для пользователей. При существенном отличии AoA и AoD каналы становятся пространственно разделимыми. Для каждого пользователя в модели канала TGac углы AoA и AoD выбираются в пределах от -180° до $+180^\circ$ в зависимости от условий наличия прямой видимости (LoS или NLoS) и в зависимости от направления передачи (вверх или вниз – Uplink/Downlink соотв.).

Изменениям подверглись и значения доплеровского сдвига. По измерениям, сделанным в [8], был сделан вывод о необходимости снижения величины доплеровского смещения, поскольку в реальных условиях внутри помещений изменение положения устройств ограничивается медленными изменениями. В связи с этим, в модели TGac были внесены следующие изменения:

- уменьшение величины доплеровского сдвига до 0,414 Гц для частоты 5 ГГц. Такое значение соответствует эквивалентной скорости движения среды $v_0 = 0.089$ км/ч, что эквивалентно минимальным изменениям в местоположении STA;
- увеличение времени когерентности канала до 800 мс. Это время показывает, в течение какого промежутка времени импульсный отклик канала считается неизменным. Это изменение также основано на выводе о большей стабильности канала, по сравнению с моделью TGn.

С. Модель канала TGax

Следующей моделью канала в БЛС стала модель TGax [5]. Эта модель представляет собой модификацию разработанных ранее моделей TGn и TGac, адаптированную под работу в высокоплотных сетях и расширенных сценариях, такие как городские среды.

Основной целью при разработке модели TGax стало повышение эффективности работы канального уровня MAC (Media Access Control) и физического уровня PHY (Physical) в высокоплотных сетях как внутри помещений, так и на открытой местности [10].

Для выполнения этой задачи в модели TGax были добавлены модели ITU-R Urban Micro (UMi) и Urban Macro (UMa) для сценариев работы вне помещений [11]. В модели UMi предполагается, что STA и AP находятся на одном уровне при их общем расположении ниже уровня крыш. В модели UMa STA по-прежнему находится ниже уровня крыш, в то время как AP может находиться выше уровня окружающих зданий. В табл. 2 представлены значения распределения задержек при распространении сигнала для моделей UMi и UMa.

ТАБЛИЦА II. ЗАДЕРЖКА РАСПРОСТРАНЕНИЯ
ДЛЯ МОДЕЛЕЙ UMi и UMa

Модель	Условие видимости	DS (ns)
UMi	LoS	65
UMi	NLoS	129
UMa	LoS	93
UMa	NLoS	363

Разница в значении распределений задержек обусловлены многолучевым распространением в условиях LoS и NLoS.

В табл. 3 приведены профили моделей задержки, введенные рабочей группой при разработке модели TGax [5].

ТАБЛИЦА III. ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРОФИЛЕЙ ЗАДЕРЖКИ

Параметр	Модель					
	A	B	C	D	E	F
Расстояние до точки прерывания, м	5	5	5	10	20	30
СКО задержки, нс	0	15	30	50	100	150
Максимальная задержка	0	80	200	390	730	1050
К-фактор, дБ	0	0	0	3	6	6
Количество отводов	1	9	14	18	18	18
Количество кластеров	1	2	2	3	4	6

Модель TGn поддерживает конфигурацию MIMO 4x4, в то время как TGax поддерживает MIMO 8x8. Для обеспечения одновременной связи множества пользовательских устройств с точкой доступа применяется механизм пространственного разнесения, основанный на вариативности угловых параметров канала. Реализация данного подхода заключается во внесении детерминированных случайных отклонений в значения углов прихода (AoA) и углов ухода (AoD) для каждого многолучевого кластера перед формированием матрицы пространственной корреляции. Уникальность смещений обеспечивается изменением параметра, отвечающего за расчеты углов AoA и AoD, что гарантирует статистическую независимость угловых характеристик кластеров между различными пользователями. Данная методика создаёт различия в пространственно-временных свойствах радиоканалов,

необходимые для эффективного разделения пользовательских потоков в MU-MIMO системах.

Далее, для расширения моделей каналов ITU-R для полосы 160 МГц и выше был предложен уменьшенный шаг дискретизации, равный 5 нс. Помимо этого, ввелось применение алгоритма интерполяции (например – сплайн, полиномиальная), чтобы получить 64 отсчета на исходный интервал, что позволило «сгладить» профиль канала.

Также, в модели TGn были внесены изменения в расчет суммарных потерь при распространении сигнала. В новой модели учитывались также потери при прохождении сигнала сквозь стены и пол. Общая формула расчета потерь выглядит следующим образом:

$$L = L_{indoor}(d) + L_{floor} + L_{wall}, \quad (3)$$

где L – суммарные потери при распространении, $L_{indoor}(d)$ – потери на распространении сигнала в зависимости от расстояния d ; L_{floor} – потери при прохождении сквозь пол, L_{wall} – потери при прохождении сигнала сквозь стены. Потери при прохождении сквозь стены и пол рассчитываются следующим образом:

$$PEL_{floor} = 18.3n^{\left(\frac{n+2}{n+1}-0.46\right)}, \quad (4)$$

$$PEL_{wall} = m * L_{iw}, \quad (5)$$

где n и m – количество этажей и стен, сквозь которые проходит сигнал; L_{iw} – потери при прохождении одной стены, обычно принимаются равными 5 дБ.

В модели TGax были внесены изменения касательно доплеровского сдвига, поскольку новые сценарии использования требовали учета скорости движения STA и AP, которые могут двигаться с большой скоростью. В TGax добавлены 2 режима – для скорости движения 3 км/ч и 60 км/ч.

D. Импульсные характеристики каналов для моделей TGn, TGac, TGax

На рис. 1, 2 и 3 приведены импульсные характеристики каналов, описанных ранее. Несущая частота сигнала, использованного при моделировании равна 5 ГГц. Частота дискретизации в модели TGn = $20 * 10^6$ Гц, TGac = $80 * 10^6$ Гц, TGax = $1 * 10^9$ Гц.

Результаты, представленные на рис. 1, 2 и 3, показывают, что энергия сигнала распределена во времени, включая основной луч (LoS) и вторичные лучи (NLoS) для TGax. Импульсная характеристика для TGn менее детализирована, что обусловлено низкой частотой дискретизации по сравнению с TGac и TGax, а кластеры более однородные без выраженного углового разнесения.

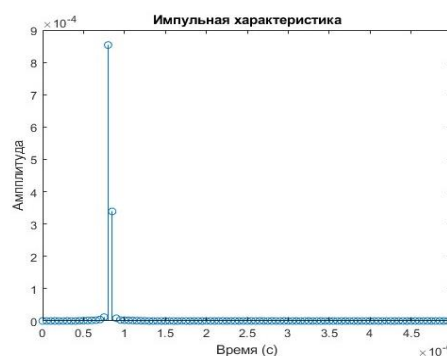


Рис. 1. Импульсная характеристика TGn

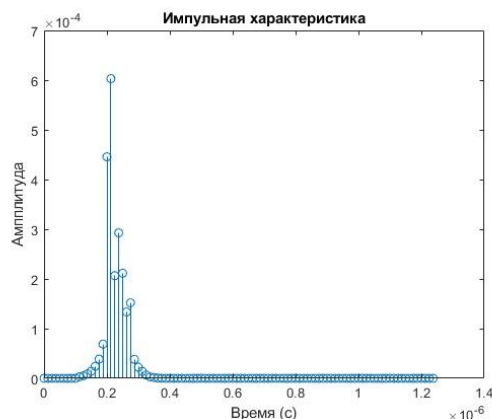


Рис. 2. Импульсная характеристика TGac

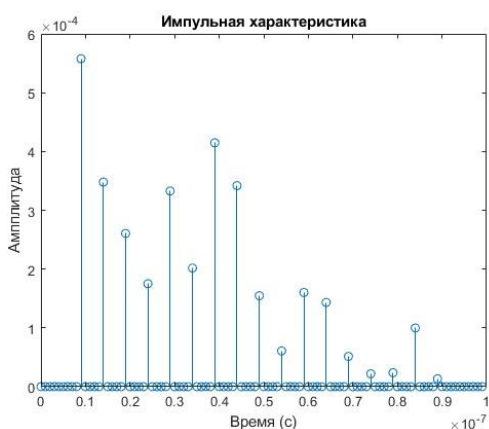


Рис. 3. Импульсная характеристика TGax

III. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье были рассмотрены модели каналов для позиционирования в сетях стандарта IEEE 802.11az. Были приведены основные особенности каналов, разработанных рабочими группами TGn, TGac и TGax. Приведены основные особенности и характеристики моделей каналов, проанализированы отличия моделей в контексте применимости их для создания БЛС с поддержкой многопользовательского режима MU-MIMO. Приведены импульсные характеристики сигналов при прохождении сквозь рассматриваемые модели. Импульсные характеристики демонстрируют временные распределения мощности сигнала в условиях многолучевого распространения, а также показывают

отличия этого распределения в зависимости от выбранной модели.

В задачах позиционирования модели канала позволяет корректно оценивать искажения сигналов, возникающие в ходе многолучевого распространения. Широкая полоса канала TGax улучшает разрешающую способность измерений времени прибытия ToA и угловых параметров AoA/AoD, на основе вычисления которых строятся алгоритмы определения местоположения STA.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] New Wi-Fi standard IEEE 802.11az. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.buildings.com> (Дата обращения 20.02.2025).
- [2] Kang Y. Analysis of Trends in the IEEE 802.11 Family Amendments //Journal of the Korea Institute of Information and Communication Engineering. 2020. T. 24. №. 11. С. 1554-1557.
- [3] Reddy V. A., Stüber G. L. Multi-user position estimation and performance trade-offs in IEEE 802.11 az WLANs //2022 IEEE 95th Vehicular Technology Conference:(VTC2022-Spring). IEEE, 2022. С. 1-5.
- [4] Picazo-Martínez P. et al. IEEE 802.11 az Indoor Positioning with mmWave //IEEE Communications Magazine. 2023. T. 62. №. 10. С. 126-131.
- [5] IEEE 802.11ax Task Group. Channel Model Document [Электронный ресурс]. URL: https://www.ieee802.org/11/Reports/tgax_update.html (дата обращения: 20.02.2025)
- [6] Erceg, V., Schumacher, L., Kyritsi, P. TGN Channel Models. Vol 4. IEEE 802.11-03/940r4, 2004.
- [7] Breit, G., Sampath, H., Vermani, S. TGac Channel Model Addendum. Vol 12. IEEE 802.11-09/0308r12, 2010.
- [8] Saleh A.A. M., Valenzuela R. A statistical model for indoor multipath propagation //IEEE Journal on selected areas in communications. 1987. T. 5. №. 2. С. 128-137.
- [9] Yamada W. et al. Statistical analysis and characterization of doppler spectrum in large office environment //Proceedings of the International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP'09). 2009. С. 564-567.
- [10] 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 22.02.2025).
- [11] Sector R. Guidelines for evaluation of radio interface technologies for IMT-Advanced //Report ITU. 2009. T. 2512. №. 0.
- [12] 802.11az Waveform Generation. MathWorks. [Электронный ресурс]. URL: https://www.mathworks.com/help/wlan/ug/802_11az_waveform_generation.html (Дата обращения 23.02.2025)