

Реализация модифицированного алгоритма суммирования синусоид с учетом доплеровского изменения частоты в **Quadriga** *

Буртаков И.^{1,2}, Ендовицкий Е.^{1,2}, Куреев А.^{1,2}
{burtakov, endovitskiy, kureev}@wireless.iitp.ru

¹ Институт проблем передачи информации им. А.А. Харкевича РАН

² Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)

Аннотация Одним из способов моделирования рэлеевского замирания в модели канала **Quadriga** является метод суммирования синусоид. Получение характеристик изменяющегося во времени канала в моделях такого типа достигается за счет учета доплеровского смещения. В данной работе рассмотрены методы суммирования синусоид **GMEDS1** и **GMEDS2** (англ.: Generalized Method of Doppler spread), суть которых состоит в представлении сигнала в виде суммы синусоид, частоты которых определяются из взаимного расположения приемника и излучателя и их движения с учетом доплеровского смещения. Методы **GMEDS1** и **GMEDS2** различаются в условиях своей применимости, что описано в . Существующий подход имеет своим недостатком квазипериодичность сигнала, что может привести к неверному предсказанию свойств каналов, планированию ресурсов и т.д. Поиск литературы и работ по соответствующей теме не выявил реализации методов **GMEDS1** или **GMEDS2** в **Quadriga**. Рассмотренные методы имплементированы в модели канала **Quadriga** и произведено сравнение с каналами, полученными с помощью **LTE Toolbox** и **5G Toolbox**.

1 Введение

Беспроводные каналы передачи данных можно разделить на два основных типа. Первым типом является канал с наличием луча прямой видимости (англ.: line-of-sight, LOS) если на линии между приемником и передатчиком нет препятствий, мешающих распространению сигнала. Вторым типом является канал с отсутствием луча прямой видимости (англ.: Non-line-of-sight, NLOS). Данный тип канала характерен для беспроводной среды с большим количеством объектов, от которых сигнал может многократно переотражаться и приходить на приемник под разными углами и с различной мощностью, при

* Исследование выполнено в ИППИ РАН за счет гранта Российского научного фонда (проект №20-19-00788), за исключением лицензий работ в **5G Toolbox** и **LTE Toolbox**, выполненных в МФТИ.

этом прямой луч между приемником и передатчиком либо отсутствует, либо его мощность сравнима по порядку величины с мощностью отраженных от препятствий лучей. Такие каналы моделируются как каналы с рэлеевскими замираниями, что описано в работе [1], где экспериментальное исследование канала в городской среде показало схожесть экспериментально полученного канала с каналом с рэлеевским замиранием. Рэлеевские замирания в свою очередь могут быть промоделированы при помощи метода суммирования синусоид, предполагающего, что результирующий сигнал может быть разложен на синусоидальные сигналы, отраженные от препятствий и излученные напрямую от передатчика.

В свою очередь, метод суммирования синусоид имеет множество различных классов его реализации, описанных в [2], среди которых основным является модель Джейкса [3]. Как было сказано ранее, данная модель основывается на методе суммы синусоид, причем рассеиватели (англ.: *scatters*) равномерно распределены по кругу под углами α_n с k лучами, выходящими из каждого рассеивателя. Доплеровский сдвиг в данной модели дается выражением $f_n = f_m \cos \alpha_n$, где f_m обозначает максимальную доплеровскую частоту, наблюдаемую в моделировании. Несмотря на широкое распространение, данная модель имеет некоторые недостатки, например, ненулевую кросс-корреляционную функцию (англ.: *crosscorrelation function*, CCF), а также автокорреляционную функцию сигнала (англ.: *autocorrelation function*, ACF), отличающуюся от таковой у исходного сигнала. Скоррелированность каналов во времени заключается в наличии ненулевой кросс-корреляционной функции канала и автокорреляционной функции модели канала, отличающейся от исходной автокорреляционной функции канала. Физически, данные условия проявляются в наличии у графика модуля канала квазипериодических колебаний. Основным методом построения моделей является метод точного учета доплеровского распространения (англ.: *Method of Exact Doppler spread*, MEDS), описанный в [4] и в [5], и именно он является исходным методом моделирования канала в Quadriga. Quadriga – стохастическая геометрическая модель канала, в которой отражение сигнала от различных объектов моделируется с помощью кластеров-отражателей. Каждый кластер описывает изменение сигнала по амплитуде и фазе при прохождении канала, и каждый из них является рассеивателем, описываемыми в модели Джейкса [3]. Их значения приведены в спецификации модели канала Quadriga и выбираются в зависимости от требований сценария моделирования.

Однако, помимо характерных недостатков, описанных ранее, расчетное время такого метода экспоненциально возрастает с увеличением количества рассматриваемых волн. В [2] описаны методы GMEDS1 и GMEDS2 (англ.: *Generalized MEDS*), исходно не реализованные в Quadriga и отличающиеся между собой угловым распределением рассеивателей, позволяющие достичь меньшей коррелированности сигналов, а также уменьшить время расчета модели. В данной работе рассматривается реализация данных методов в Quadriga и их анализ. Сравнительный анализ проводится со средой

5G Toolbox и LTE Toolbox, одобренные комитетом 3GPP для моделирования беспроводного канала, характерного для сотовых сетей. К сожалению, устройство данных моделей закрыто и не представляется возможным узнать, как именно, реализован механизм изменения канала во времени в данных моделях. Единственной информацией, доступной исследователям, является лишь строчка в спецификации модели канала LTE Toolbox, указывающая на использование GMEDS без конкретного уточнения о каком именно GMEDS идет речь.

В данной работе представлена реализация методов GMEDS1 и GMEDS2 в модели канала Quadriga. Реализация данных методов позволяет приблизить результаты моделирования канала в Quadriga к каналам, полученным с помощью 5G Toolbox и LTE Toolbox.

2 Постановка задачи

Основной задачей является расширение возможностей Quadriga с целью получения модели канала в беспроводной среде с уменьшенной, по сравнению с исходным методом в Quadriga, скоррелированностью каналов. Необходимо провести моделирование нескоррелированного во времени сигнала. Методы GMEDS1 и GMEDS2 различаются в условиях своей применимости, что описано в [2]: GMEDS1 применим для относительно малых значений времени имитации, а GMEDS2 для больших. В исходной модели канала Quadriga в случае стационарного положения приемника и передатчика отсутствует учет доплеровского набега фаз в случае, который необходим при реализации GMEDS1 и GMEDS2, поэтому в первую очередь был реализован учет набега фаз, без изменения исходного распределения отражателей, приемника и передатчика.

$$\tilde{\zeta}(t) = |\tilde{\mu}(t)| = |\tilde{\mu}_1(t) + j\tilde{\mu}_2(t)|, \quad (1)$$

где каждый сигнал представляется в виде

$$\tilde{\mu}_i(t) = \sqrt{\frac{2}{N_i}} \sum_{n=1}^{N_i} \cos(2\pi f_{i,n}t + \theta_{i,n}), \quad i = 1, 2. \quad (2)$$

где N_i определяет количество синусоид распространяющихся от рассеивателя, $f_{i,n}$ является доплеровской частотой. В свою очередь $\theta_{i,n}$ является фазой n -ой синусоиды фазовой компоненты $\tilde{\mu}_1(t)$ или квадратурной компонентой $\tilde{\mu}_2(t)$, что показано в выражении (1). Фазы $\theta_{i,n}$ являются независимым и одинаково распределенными случайными величинами $\theta_{i,n}$, каждая из них имеет одинаковое распределение на множестве $(0, 2\pi]$.

Рассмотрим пример реализации канала в модели Quadriga Канал на рис. 1 обладает квазипериодичностью, которая выражается в повторении характера канала через определенные промежутки времени. Например, На рис. 1 видно, что максимумы повторяются с периодом приблизительно равным 35

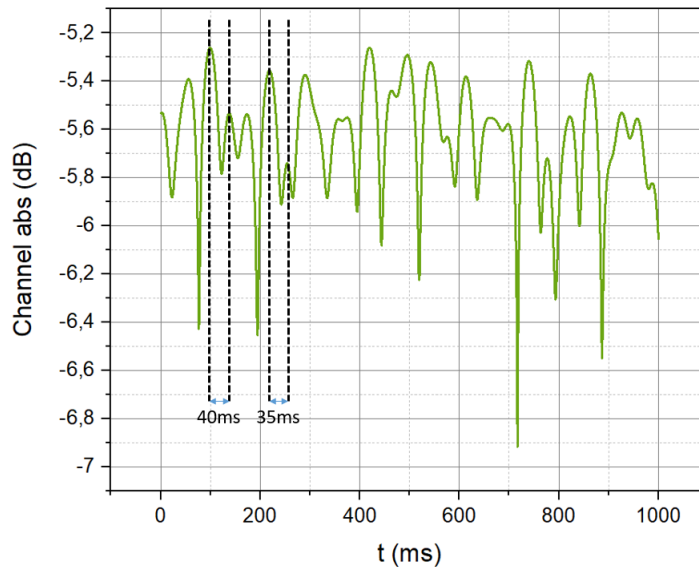


Рис. 1. Затухание в канале Quadriga MEDS.

- 40 мс. Для сравнения, можно привести реализацию канала из модели 5G Toolbox на рис. 2

Видно при той же самой доплеровской частоте, соответствующей скорости перемещения приемника 5 км/ч, ее поведение отличается от реализованного в Quadriga MEDS.

Имитационная модель 5G Toolbox является сертифицированной комитетом IEEE и работает согласно спецификации 38.901 [6], 3GPP рекомендует использовать данную модель для имитации каналов во времени. У данной модели ряд недостатков, например некорректный учет пространственной корреляции сигналов, что является критически важным для моделирования передачи данных в многоантенных системах.

Квазипериодичность сигнала характеризуется периодами, наблюдаемыми в графике канала во времени. Данные периоды можно рассматривать как дискретную случайную величину, характеризуемую её функцией распределения и производными от неё величинами. Например, чем больше дисперсия описываемой случайной величины, тем больше изменяется расстояние между соседними максимумами реализации канала, что снижает ее квазипериодичность. Так, для имитаций каналов на 10000 мс дисперсия для Quadriga MEDS составляет $D_Q \approx 150$, а для 5G Toolbox $D_M \approx 470$.

Разбив все множество периодов между локальными максимумами на интервалы в x мс и отнормировав на среднее, построим гистограмму локальных максимумов. Из рис. 3 видно, что распределение максимумов для

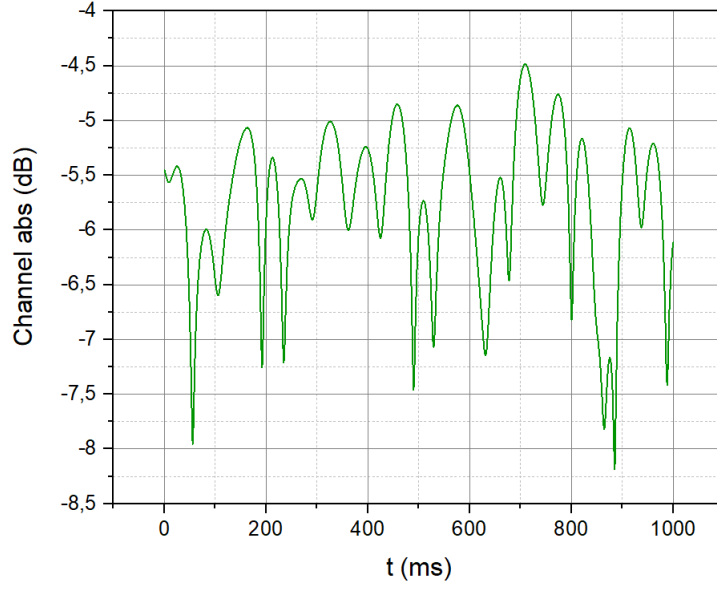


Рис. 2. Затухание в канале 5G Toolbox.

Quadriga MEDS имеет более острый пик, а также быстрее убывает после его достижения, что говорит о большей квазипериодичности, чем у 5G ToolBox.

Помимо введенных ранее критериев, существует еще один, описанный в [2], и связанный с автокорреляционной функцией канала.

Для сигналов вида (1) сигналов ACF имеет вид

$$\begin{aligned}
 \tilde{r}_{\mu_i \mu_i}(\tau) &= \langle \tilde{\mu}_i(t) \tilde{\mu}_i(t + \tau) \rangle = \\
 &= \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T \tilde{\mu}_i(t) \tilde{\mu}_i(t + \tau) dt = \\
 &= \frac{1}{N_i} \sum_{n=1}^{N_i} \cos(2\pi f_{i,n} \tau).
 \end{aligned} \tag{3}$$

Для выполнения задачи уменьшения скоррелированности сигнала во времени необходимо выполнить условие на автокорреляционную функцию смоделированного сигнала. ACF $\tilde{r}_{\mu_i \mu_i}(\tau)$ имитационной модели должна быть с известной точностью близка к ACF $r_{\mu_i \mu_i}(\tau)$ данного сигнала на исследуемом промежутке времени полной имитации $[0, \tau_{\max}]$.

$$\tilde{r}_{\mu_i \mu_i}(\tau) \approx r_{\mu_i \mu_i}(\tau), \quad \forall \tau \in [0, \tau_{\max}] \tag{4}$$

В случае комплекснозначного сигнала $\tilde{\mu}(t) = \tilde{\mu}_1(t) + j\tilde{\mu}_2(t)$ автокорреляционная функция имеет вид $\tilde{r}_{\mu\mu}^{(k)}(\tau) = \tilde{r}_{\mu_1\mu_1}^{(k)}(\tau) + \tilde{r}_{\mu_2\mu_2}^{(k)}(\tau)$ В случае модели

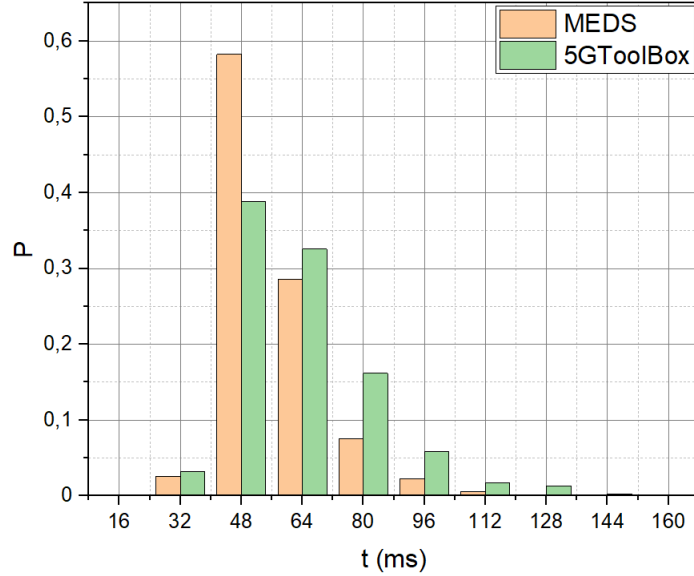


Рис. 3. Распределение периодов по временным интервалам для Quadriga MEDS и 5G Toolbox.

Джейкса, описываемой в [3] и [2], АСФ исследуемого сигнала $r_{\mu_i\mu_i}(\tau)$ является $r_{\mu_i\mu_i}(\tau) = J_0(2\pi f_{\max}\tau)$, $i = 1, 2$, где $J_0(\cdot)$ является функцией Бесселя нулевого порядка, f_{\max} является максимальной доплеровской частотой, наблюдаемой в модели. В случае же рассматриваемого комплексного сигнала $r_{\mu\mu}(\tau) = 2r_{\mu_i\mu_i}(\tau) = 2J_0(2\pi f_{\max}\tau)$, при условии обнуления ССФ $\tilde{r}_{\mu_i\mu_\lambda}^{(k,l)}(\tau)$ сигналов $\tilde{\mu}_i(t)$ и $\tilde{\mu}_\lambda(t)$, $\forall \tau$, $i \neq \lambda$.

В работе [2] показано, что при выполнении условий

$$\left\{ f_{i,n}^{(k)} \right\}_{n=1}^{N_i} \cap \left\{ f_{\lambda,m}^{(l)} \right\}_{m=1}^{N_\lambda} = \{\emptyset\},$$

где $i \neq \lambda (i, \lambda = 1, 2)$, $k \neq l (k, l = 1, 2, \dots, K)$, где K обозначает число взаимно нескоррелированных волновых форм, описывающих рэлеевское замирание, описанное в выражении (1) выполняется при

$$\begin{aligned} \tilde{r}_{\mu_i\mu_\lambda}^{(k,l)}(\tau) &= 0, \forall \tau, \quad i \neq \lambda \\ \tilde{r}_{\mu_i\mu_i}^{(k,l)}(\tau) &= 0, \forall \tau, \quad k \neq l \end{aligned} \quad (5)$$

Данное условие выполнено в случае использования кластерной модели среды. Для определения степени скоррелированности сигналов вводится функция ошибки

$$L_2 = \left[\frac{1}{\tau_{\max}} \int_0^{\tau_{\max}} |\tilde{r}_{\mu_i\mu_i}(\tau) - r_{\mu_i\mu_i}(\tau)|^2 d\tau \right]^{1/2}. \quad (6)$$

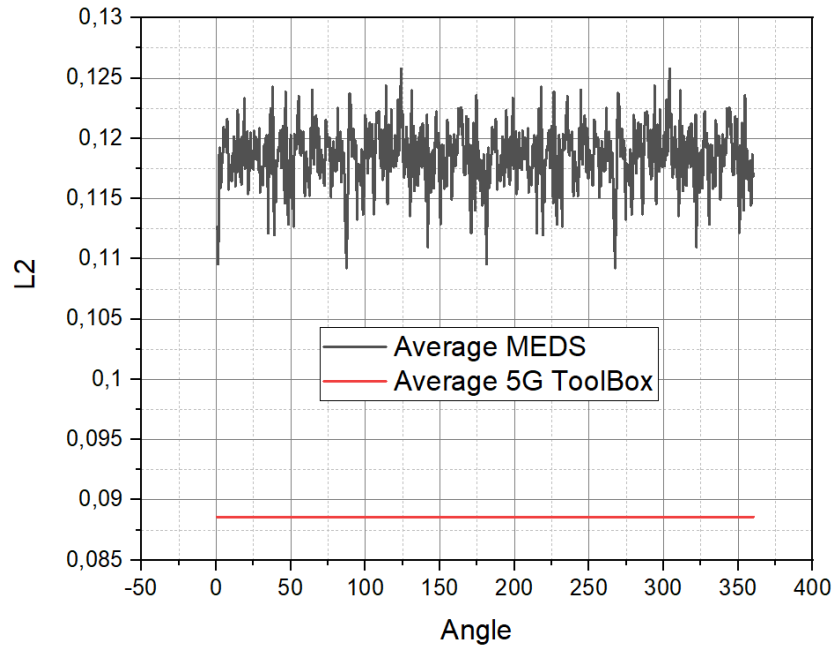


Рис. 4. Сравнение значений функции ошибки для Quadriga MEDS, 5G Toolbox.

которая позволяет количественно сравнить качество приближения ACF имитации к исходной ACF. Физическим смыслом данного выражения является суммарное отклонение автокорреляционной функции имитации от автокорреляционной функции исходной модели за все время имитации τ_{\max} . Соответственно, чем меньше значение интеграла (6), тем менее скоррелированным является канал.

В итоге, видно, что по всем трем критериям существуют отличия метода Quadriga MEDS от 5G Toolbox и LTE Toolbox. Утверждается, что в LTE Toolbox используется метод, заключающийся в изменении положения кластеров в пространстве для снижения скоррелированности и именуемый GMEDS. Однако непонятно каким образом реализован данный метод, поскольку код 5G Toolbox и LTE Toolbox является закрытым.

Целью данной работы является реализация метода GMEDS1 и GMEDS2 для снижения квазипериодичности канала в Quadriga и сравнения результатов с моделями 5G Toolbox и LTE Toolbox.

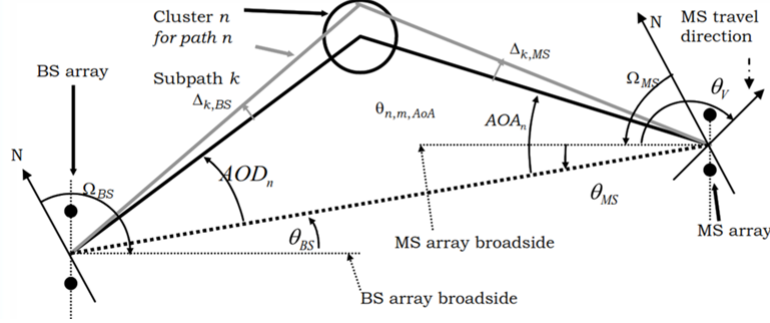


Рис. 5. Принцип моделирования канала в Quadriga.

3 Описание методов GMEDS1 и GMEDS2

Доплеровские частоты в модели Джейкса даются выражением

$$\begin{aligned}
 f_{i,n}^{(k)} &= f_{\max} \cos(\alpha_{i,n}^{(k)}) = \\
 &= f_{\max} \cos\left[\frac{q\pi}{2N_i}\left(n - \frac{1}{2}\right) + \alpha_{i,0}^{(k)}\right].
 \end{aligned} \tag{7}$$

Согласно работе [2], в случае использования GMEDS1 и GMEDS2 выражения для $\alpha_{i,0}^{(k)}$ принимают вид

$$\alpha_{i,0}^{(k)} := (-1)^{i-1} \frac{\pi}{4N_i} \cdot \frac{k}{K+2}, \quad q = 1, \tag{8}$$

$$\alpha_{i,0}^{(k)} = \frac{\alpha_{\text{per}}}{2} \cdot \frac{k-1}{K-1} = \frac{\pi}{4N_i} \cdot \frac{k-1}{K-1}, \quad q = 2, \tag{9}$$

соответственно. При этом амплитуды приходящих на приемник сигналов должны быть отнормированы на одно значение.

В работе [2] приводится сравнение значений (6) для методов MEDS, GMEDS1 и GMEDS2. Сравнение данных значений позволяет сказать, что при использовании методов GMEDS1 и GMEDS2 скоррелированность сигналов становится значительно ниже, по сравнению с MEDS.

Важную роль в Quadriga играют понятие угла прихода луча на приемник (англ.: Angle of arrival) AoA и угла отправления луча (англ.: Angle of departure) AoD, которые описывают взаимное расположение в пространстве источника сигнала, кластера-отражателя и самого приемника (Рис. 5).

Методы GMEDS1 и GMEDS2 в Quadriga были реализованы выбором направления азимутальной составляющей вектора скорости приемника. Выбор направления скорости приемника проще в реализации, по сравнению с

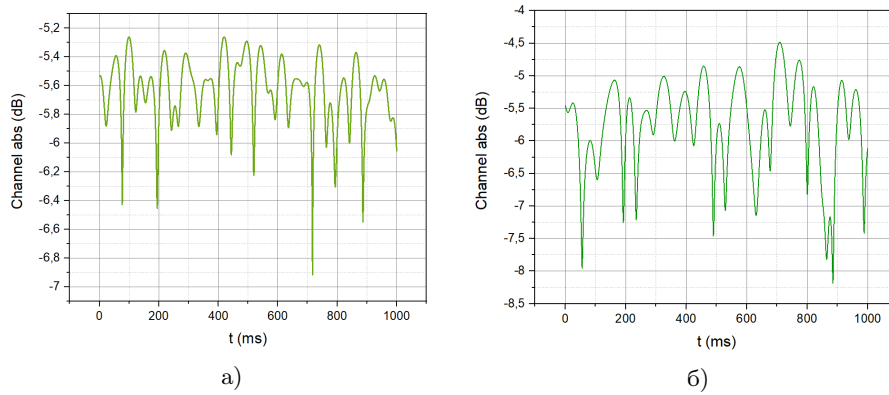


Рис. 6. Затухание в канале а) Quadriga MEDS и б) 5G Toolbox.

реализацией движения кластеров, а также не нарушает условия применимости модели Джейкса:

$$\frac{\nu_f}{\nu_e} = \frac{1 - c \cdot v}{\sqrt{1 - v^2}}, \quad (10)$$

где ν_f — доплеровская частота, ν_e — центральная частота, c — вектор распространения сигнала, v — вектор скорости приемника. Такая замена движущегося объекта корректна, поскольку в формуле доплеровского смещения важна относительная скорость движения объектов, знак же перед скалярным произведением учтен в выборе направления скорости приемника, что позволяет выполнить соотношения (8) и (9) изменяя значения угла прихода луча.

4 Численные результаты

Поскольку скоррелированность сигналов в случае применения метода суммы синусоид заключается в наличии у функции модуля канала колебаний, визуально различимых на фоне элементов, характерных для канала с рэлеевским замиранием, что можно видеть на рис. 6, то возможно применение метрики, вычислительно более простой, чем L_2 . Описанная далее метрика позволяет провести первичный визуальный анализ реализованного метода, с дальнейшим применением более точных методов анализа модели. Данная метрика состоит в построении графика функции распределения (англ.: Cumulative distribution function) случайной величины, которой является расстояние между максимумами модуля канала.

На рис. 7 приведены результаты построения метрик метода функции распределения для различных методов имитации в Quadriga, а также в 5G Toolbox и LTE Toolbox. Можно видеть, что реализации методов GMEDS1 и GMEDS2 обладают в области быстрого роста более пологой функцией распределения, что означает меньшую скоррелированность сигнала. 5G Toolbox и

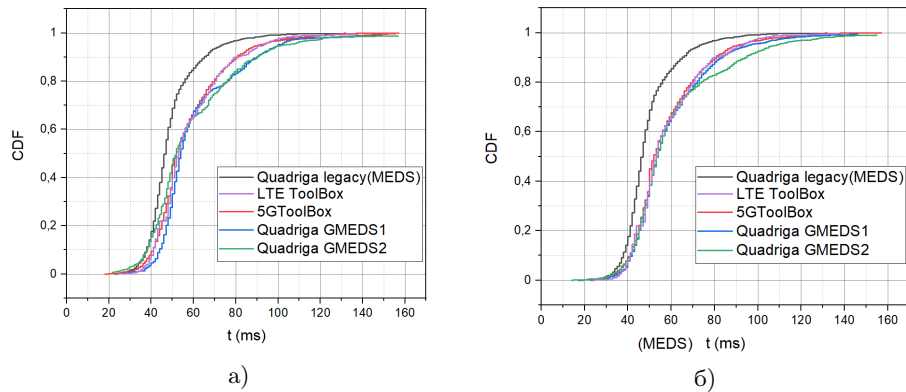


Рис. 7. Графики CDF для Quadriga GMEDS1 и Quadriga GMEDS2 в случае а) различных и б) одинаковых амплитуд синусоид, Quadriga legacy(MEDS), 5G Toolbox, LTE Toolbox.

LTE Toolbox дают похожие результаты. Quadriga MEDS сильно отличается от них, GMEDS1 и GMEDS2 дают результат похожий на 5G Toolbox и LTE Toolbox.

В случае нормировки амплитуд сходимость графика функции распределения на рис. 7 становится более равномерной, что логично, поскольку в модели Джейкса используются сигналы с нормированными амплитудами. После исследования моделей каналов при помощи CDF-метрики приведем сравнение значений L_2 -норм для различных методов имитации канала.

Из рис. 9 можно видеть, что значение L_2 -нормы для реализованных методов GMEDS1 и GMEDS2 меньше, чем в MEDS для любого угла прихода луча AoA, что означает меньшую скоррелированность сигнала. Значения норм для GMEDS1 и GMEDS2 в данной модели получается практически одинаковыми, с точностью до приближения расчета интеграла (6).

5 Заключение

В данной работе рассмотрена задача понижения скоррелированности временной эволюции канала в Quadriga при помощи методов GMEDS1 и GMEDS2. Описаны общие принципы построения модели канала с рэлеевским замиранием с использованием GMEDS1 и GMEDS2. Было проведено сравнение реализованных методов с моделями канала в 5G Toolbox и LTE Toolbox при помощи различных метрик канала, таких как дисперсия появления локальных максимумов во временной эволюции канала и их гистрограмма, L_2 -метрика, отражающая отличие автокорреляционной функции смоделированного канала от канала с рэлеевскими замираниями. Показано, что реализация данных методов позволяет снизить скоррелированность канала, что выражается в уменьшении степени квазипериодичности сигнала во времени.

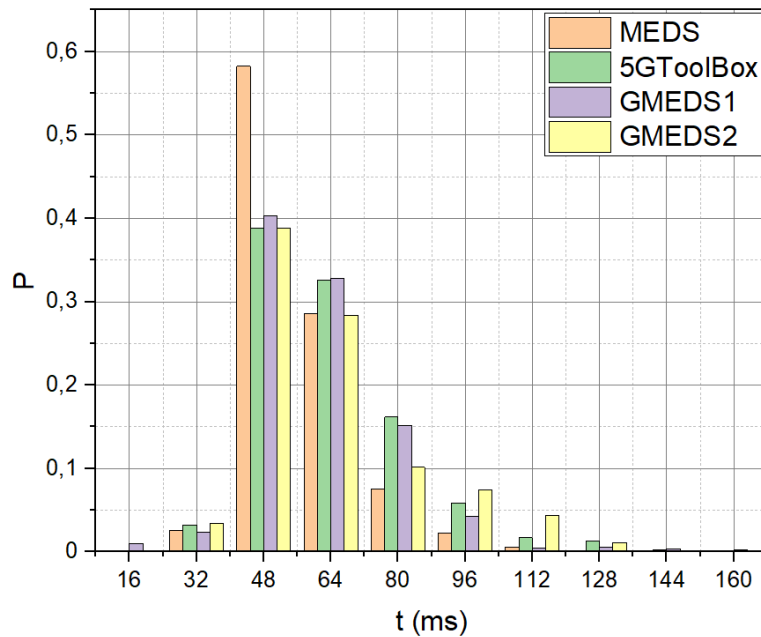


Рис. 8. Распределение периодов по временным интервалам для Quadriga MEDS и 5G Toolbox, Quadriga GMEDS1, Quadriga GMEDS2.

Список литературы

1. Multiple-input-multiple-output measurements and modeling in Manhattan / Dmitry Chizhik, Jonathan Ling, Peter W Wolniansky et al. // IEEE Journal on Selected Areas in Communications. — 2003. — Vol. 21, no. 3. — P. 321–331.
2. Matthias Pätzold Senior Member IEEE Cheng-Xiang Wang Senior Member IEEE, Hogstad Bjørn Olav. Two New Sum-of-Sinusoids-Based Methods for the Efficient Generation of Multiple Uncorrelated Rayleigh Fading Waveforms // IEEE transactions on wireless communications. — 2009. — Vol. 8, no. 6. — P. 1.
3. W.C.Jakes. Microwave Mobile Communications. — 1994.
4. M. Pätzold U. Killat F. Laue, Li Y. On the statistical properties of deterministic simulation models for mobile fading channels // IEEE transactions on wireless communications. — 1998. — Vol. 47, no. 1. — P. 254–269.
5. Wang Cheng-Xiang, Patzold Matthias. Methods of generating multiple uncorrelated Rayleigh fading processes // The 57th IEEE Semiannual Vehicular Technology Conference, 2003. VTC 2003-Spring. / IEEE. — Vol. 1. — 2003. — P. 510–514.
6. ETSI TR 138 901 5G; Study on channel model for frequencies from 0.5 to 100 GHz (3GPP TR 38.901 version 14.0.0 Release 14) / IEEE. — 2017.

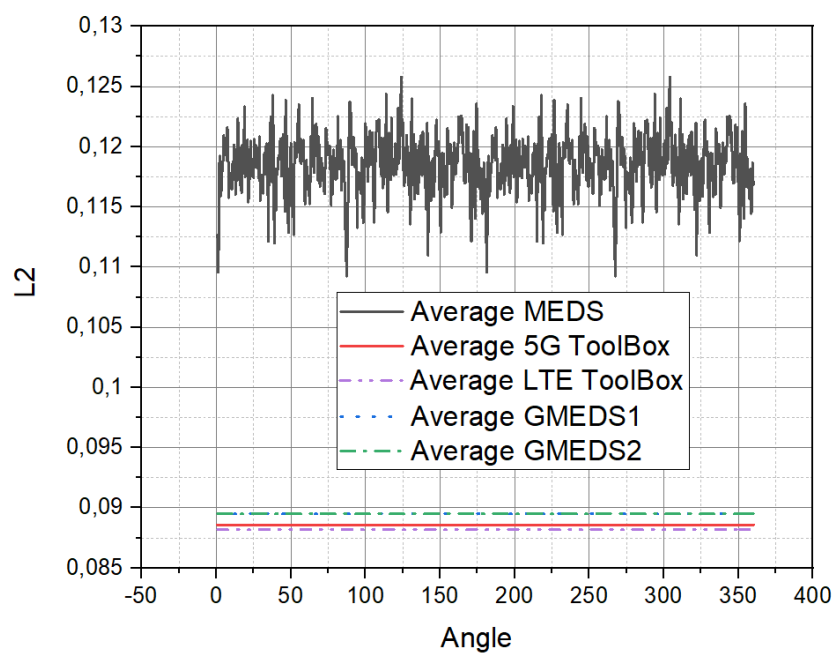


Рис. 9. Сравнение значений функции ошибки для Quadriga MEDS, GMEDS1, GMEDS2 и 5G ToolBox.