

УДК 621.396.49

РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ И КЛАССИФИКАЦИЯ МИМО КАНАЛОВ СВЯЗИ В ТРЕХМЕРНОЙ СИСТЕМЕ КООРДИНАТ

Паршин А.Ю., к.т.н., доцент, доцент кафедры РТУ Рязанского государственного радиотехнического университета им. В.Ф. Уткина, e-mail: parshin.a.y@rsreu.ru

Нгуен В.Х., аспирант Рязанского государственного радиотехнического университета им. В.Ф. Уткина, e-mail: khanhkhankpr@gmail.com

MODEL DEVELOPMENT AND CLASSIFICATION OF MIMO COMMUNICATION CHANNELS IN 3D COORDINATES

Parshin A.Yu., Nguen V.Kh.

The work is devoted to investigation and classification of three-dimensional models of MIMO communication channels. The basis for the classification are scenarios for the location of diffusers according to the COST 259 standard. The simulation assumes the distribution of scatterers along a spheroid or ellipsoid, depending on the scenario under consideration. The positions of the scatterers are set by angular directions in the angle of the place and azimuth, as well as the distance that the signal travels when propagating between the antenna elements of the transmitting and receiving devices, taking into account the reflection from the scatterer. The paper investigates the parameters of the communication channel in the distribution of scatterers according to a uniform or Gaussian law. The correlation matrix of channel coefficients is calculated. The dependences of the dispersion of the channel coefficient on the position of the scatterers under various scenarios and types of distribution of scatterers are constructed. The correspondence of theoretical calculation and modeling is shown.

Key words: geometric model of signal propagation, probability density of signal arrival angles, MIMO communication system, distribution of scatterers, three-dimensional model.

Ключевые слова: геометрическая модель распространения сигналов, плотность вероятности углов прихода сигналов, система связи МИМО, распределение рассеивателей, трехмерная модель.

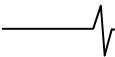
Введение

Организация связи в многоантенной системе выполняется в условиях многолучевого распространения сигнала при наличии рассеивателей, расположенных в различных частях пространства между передающим и приемным устройствами. Наличие препятствий приводит к искажению амплитуды и фазы принимаемого сигнала. Рассеиватели, удаленные от средств радиосвязи, оказывают меньшее влияние на возникающие фазовые и амплитудные отличия между сигналами от разных антенн передатчика, в то время как рассеиватели вблизи антенных систем радиотехнических устройств могут значительно изменить углы прихода сигналов на антенны приемника. Необходимо учитывать эти изменения при измерении матрицы канальных коэффициентов МИМО системы связи и ее использовании для повышения пропускной способности канала связи.

Для учета изменения амплитуды и фазы сигнала при распространении вводятся модели расположения рассеивателей в канале связи. Известны однокольцевая модель с равномерным размещением рассеивателей [1, 2], гауссовское распределение на плоскости и равномерное размещение рассеивателей внутри ограниченного круга [1]. Кроме того, рассматриваются трехмерные

Посвящена разработке и классификации трехмерных моделей МИМО каналов связи. Основой для классификации являются сценарии расположения рассеивателей по стандарту COST 259. При моделировании предполагается распределение рассеивателей по сферойду или эллипсоиду в зависимости от рассматриваемого сценария. Положения рассеивателей задаются угловыми направлениями по углу места и азимуту, а также расстоянием, которое проходит сигнал при распространении между антенными элементами передающего и приемного устройств с учетом отражения от рассеивателей. Проводится исследование параметров канала связи при распределении рассеивателей по угловой координате по равномерному или гауссовскому закону. Проведен расчет корреляционной матрицы канальных коэффициентов. Получены зависимости величины дисперсии канального коэффициента от положения рассеивателей при различных сценариях и типах распределения рассеивателей. Показано соответствие теоретического расчета и моделирования.

модели размещения рассеивателей, например, на сфере или цилиндре ограниченного радиуса [3-7]. В трехмерном случае определяющими являются углы прихода сигнала в азимутальном и угломестном направлении. Введение углов в сферических координатах при заданной длине вектора, соединяющего антенну и рассеиватель позволяет однозначно задать положение рассеивателя в пространстве. Следовательно, параметры трехмерных моделей в пространстве следует рассматривать в зависимости от распределения угловых координат. В работах [4, 5] вводятся равномерное, гауссовское и релеевское распределения угловых параметров рассеивателей. Декартовы координаты объектов в пространстве получаются путем преобразования сферических координат.



При оценке канальных коэффициентов для различных положений рассеивателей в пространстве используются различные модели, в том числе однокольцевая модель, описанная в работе [8]. Предполагается, что расстояние от антенн до рассеивателей значительно превышает линейные размеры антенной системы. В этом случае допускается не учитывать искажение фронта волны при распространении в пространстве и считать волну плоской. Для трехмерных моделей применяются аналогичные предположения. Расположение рассеивателей в пространстве описывается различными сценариями, в соответствии со стандартом моделирования каналов связи COST 259 [9].

Моделирование и расчет матрицы канальных коэффициентов выполняются путем определения координат рассеивателей в пространстве, расчета расстояния от передающего устройства до рассеивателя и от рассеивателя до приемника, оценки получаемого набега фазы относительно прямого пути распространения и расчета фазовых искажений при отражении от нескольких объектов вблизи приемной антенной системы. Методика расчета описана также в работах [10-12]. Амплитудные искажения оцениваются с использованием затухания сигнала в пространстве по модели Фрииса, а также путем учета изменения амплитуды сигнала при суммировании прямого и отраженных сигналов на антенной системе.

Цель работы заключается в исследовании зависимостей амплитудных и фазовых искажений сигнала при различных сценариях расположения рассеивателей в пространстве, а также сравнении корреляционных матриц, полученных по результатам оценки канальных коэффициентов многоантенной системы с учетом затухания сигнала в пространстве.

Модели и сценарии канала связи

Оценивание пропускной способности канала связи выполняется путем моделирования канала по стандарту COST 259 [9], которым предусмотрено многолучевое распространение сигнала. Многолучевость формируется при отражении сигнала от многочисленных рассеивателей на пути распространения сигнала. Стандартом COST 259 предусмотрены следующие конфигурации расположения рассеивателей в пространстве распространения сигнала:

– сценарий А – рассматривается группа рассеивателей вблизи приемного устройства, около передающего устройства рассеивателей нет, сценарий соответствует моделированию нисходящего канала;

– сценарий В – рассеиватели концентрируются вблизи антенной системы передающего устройства, вблизи приемного устройства рассеивателей нет, сценарий соответствует моделированию восходящего канала;

– сценарий С – обеспечение связи в городской застройке, рассеиватели размещаются в пространстве между передающим и приемным устройством, большой разброс значений углов отражения;

– сценарий D – обеспечение связи в сельской местности, рассеиватели размещаются в пространстве между передающим и приемным устройством, малый раз-

брос значений углов отражения;

– сценарий Е – значительный разброс углов отражения, сигналы приходят со всех направлений, рассеиватели расположены вокруг области размещения передающего и приемного устройств.

В работе [3] рассматриваются модели расположения рассеивателей на поверхности сферы с центром в месте расположения передающего или приемного устройств, что соответствует сценариям А и В. В работах [4, 5] рассмотрено моделирование расположения рассеивателей по сценарию Е на поверхности и в объеме эллипсоида, в фокальных точках которого размещаются устройства связи. В процессе исследования проведено моделирование размещения рассеивателей посередине между устройствами связи по сценариям С и D. На величину корреляции канальных коэффициентов оказывает влияние расстояние между передатчиком и приемником, ширина углового спектра и направление максимума углового спектра, что определяется расположением отражателей на местности.

При оценке канальных коэффициентов необходимо определить модель расположения рассеивателей с учетом выбранного сценария. С целью снижения вычислительной сложности задачи положим размещение рассеивателей на поверхностях простых форм – сфера и эллипсоид. Координаты рассеивателей определяются угловым направлением в азимутальной и угломестной плоскости в системе координат приемного или передающего устройства.

Для оценки влияния вида распределения угловых координат рассеивателей на корреляционные свойства канальных коэффициентов угловые положения рассеивателей по азимуту и углу места задаются в соответствии с равномерной или гауссовской плотностями распределения. В частности, для анализа выбрано усеченное гауссовское распределение углов места рассеивателей

$$f(\beta_s) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{\beta_s}} e^{-\frac{\beta_s^2}{2\sigma_{\beta_s}^2}}, -\pi \leq \beta_s \leq \pi,$$

и равномерное распределение углов в азимутальной плоскости

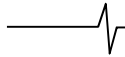
$$f(\gamma_s) = \frac{1}{2\pi}, 0 \leq \gamma_s \leq 2\pi,$$

где β_s и γ_s – угломестное и азимутальное направление на рассеиватель, соответственно.

При моделировании используются относительные единицы измерения расстояния. В частности, радиус сферы рассеивателей по сценариям А и В, равный 100 метрам, полагается $r = 1$. Тогда расстояние между приемным и передающим устройствами $D = 100$. Пересчет координат из сферической системы в декартову выполняется по следующим выражениям:

$$x = r \cos \beta_s \sin \gamma_s, y = r \cos \beta_s \cos \gamma_s, z = r \sin \beta_s.$$

Для сценариев COST259 А (рис. 1) и В (рис. 2) при задании угловых координат в соответствии с выбранными плотностями распределения вероятности угловых координат вокруг приемника или передатчика формируется сфера рассеивателей со скоплением в верхней части эллипсоида рассеивателей в выбранной системе



координат. Поворот сферы на углы ψ_x, ψ_y, ψ_z , вокруг осей Ox, Oy или Oz выполняется путем умножения вектора координат рассеивателей на матрицы преобразования по осям:

$$M_x(\psi_x) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \psi_x & -\sin \psi_x \\ 0 & \sin \psi_x & \cos \psi_x \end{bmatrix},$$

$$M_y(\psi_y) = \begin{bmatrix} \cos \psi_y & 0 & \sin \psi_y \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \psi_y & 0 & \cos \psi_y \end{bmatrix},$$

$$M_z(\psi_z) = \begin{bmatrix} \cos \psi_z & -\sin \psi_z & 0 \\ \sin \psi_z & \cos \psi_z & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

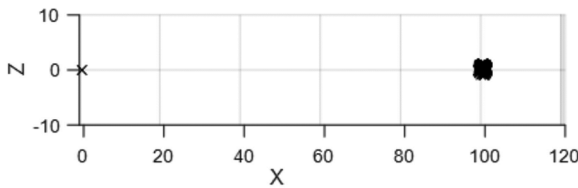


Рис. 1. Расположение рассеивателей по сценарию А

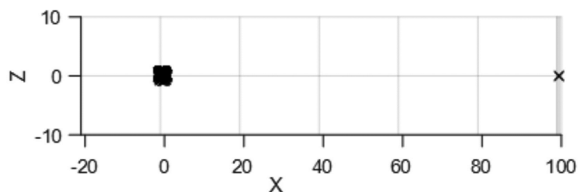


Рис. 2. Расположение рассеивателей по сценарию В

Сценарий Е (рис. 3) предполагает размещение рассеивателей по поверхности эллипсоида с расположением приемного и передающего устройства в фокальных точках эллипса сечения в плоскости xOz . Пересчет координат из сферической системы в декартову выполняется по выражениям $x = a \cos \beta_s \sin \gamma_s$, $y = b \cos \beta_s \cos \gamma_s$, $z = c \sin \beta_s$, где a, b, c – длины полуосей эллипсоида.

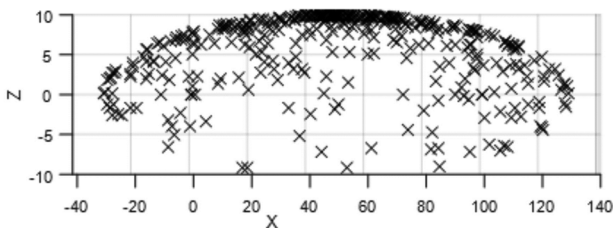


Рис. 3. Расположение рассеивателей по сценарию Е

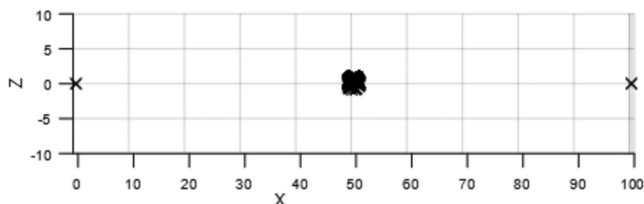


Рис. 4. Расположение рассеивателей по сценарию С

В сценариях С (рис. 4) и D (рис. 5) моделирование расположения рассеивателей выполняется на поверх-

ности сферы, цилиндра или эллипсоида, условно размещенного посередине между приемным и передающим устройствами. При этом радиусы фигур выбираются значительно меньшими, чем расстояние между приемником и передатчиком. Формулы расчета координат рассеивателей аналогичны формулам в сценариях А и В, моделируется гауссовское распределение в угломестной плоскости и равномерное распределение по углу азимута.

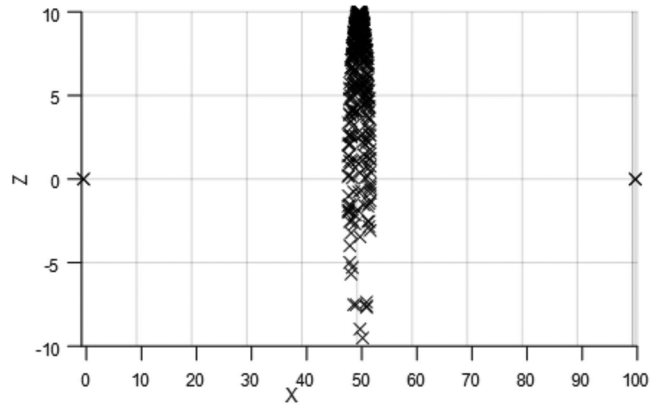


Рис. 5. Расположение рассеивателей по сценарию D

Расчет канальных коэффициентов

Для оценки влияния расположения отражателей на параметры канала связи предлагается выполнить оценку канальных коэффициентов MIMO системы связи для двухэлементных антенных систем на приемном и передающем устройстве. Оценка выполняется для каждого канала между приемными и передающими антеннами при расположении рассеивателей по различным сценариям в стандарте COST 259. Условия исследования следующие:

- сигнал является плоской волной;
- рассеиватели не обладают направленной диаграммой рассеяния;
- в работе не учитывается эффект «затенения», взаимодействие сигнала происходит только с одним рассеивателем.

Расстояние между передающей антенной и рассеивателем, а также отражателем и приемной антенной определяется путем задания координат антенн и рассеивателей в пространстве. Антенны передающего и приемного устройств зафиксированы в пространстве. Отсчет координат выполняется относительно передающего устройства, таким образом его координаты $(0, 0, 0)$. Приемное устройство располагается на расстоянии $D = 100$ от передающего устройства по оси Ox . При проведении моделирования расположение рассеивателей задается по каждому из ранее указанных сценариев. Их положения определяются углами γ_s в азимутальной плоскости и β_s в угломестной плоскости.

Рассеиватели располагаются на сфере в соответствии со сценарием COST259 А, как показано на рис. 6. Антенны на приемном и передающем устройствах располагаются на расстоянии $d = \lambda/2$, где λ – длина волны, которая в расчетах полагается равной $\lambda = r/1000$.

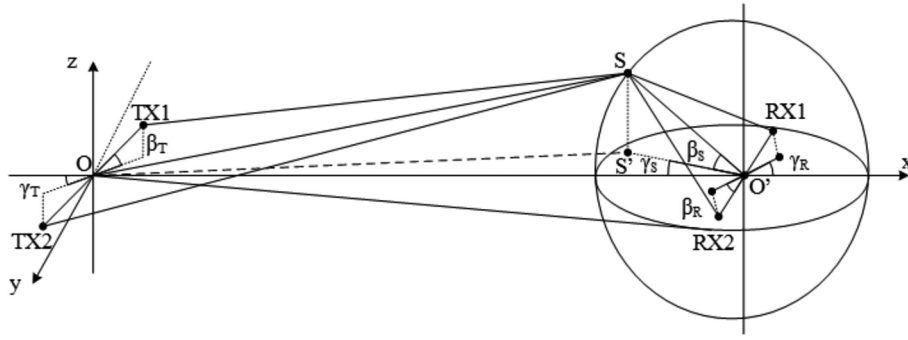


Рис. 6. Геометрическая трехмерная модель расположения рассеивателей на сфере вблизи приемного устройства (сценарий А)

При отсутствии прямой видимости канальный коэффициент передачи h_{TX_k, RX_l} для каждой пары приемных и передающих антенн можно рассчитать в соответствии с выражением [5]:

$$h_{TX_k, RX_l} = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{n=1}^N a_n b_n e^{j\phi_n},$$

$$k = 1, \dots, N_{TX}, l = 1, \dots, N_{RX},$$

где $a_n = L_{TX_{k,n}} e^{\frac{j2\pi D_{TX_{k,n}}}{\lambda}}$ – коэффициент, определяющий изменение амплитуды и фазы сигнала на участке от передающей антенны до n -го отражателя с учетом потерь

мощности при распространении, $b_n = L_{RX_{l,n}} e^{\frac{j2\pi D_{RX_{l,n}}}{\lambda}}$ – коэффициент, определяющий изменение амплитуды и фазы сигнала на участке от n -го отражателя до приемной антенны с учетом потерь мощности при распространении, ϕ_n – смещение фазы при отражении от рассеивающего объекта. Потери мощности сигнала в зависимости от расстояний рассчитывается по модели затухания сигнала для свободного пространства (модель Фрииса):

$$L_{TX_{k,n}} = \left(\frac{\lambda}{4\pi D_{TX_{k,n}}} \right)^2, \quad L_{RX_{l,n}} = \left(\frac{\lambda}{4\pi D_{RX_{l,n}}} \right)^2.$$

Расстояния между передающими антеннами и отражателями, а также между отражателями и приемными антеннами равны:

$$D_{TX_{1,n}} = \sqrt{(x_{S_n} - x_{TX1})^2 + (y_{S_n} - y_{TX1})^2 + (z_{S_n} - z_{TX1})^2},$$

$$D_{TX_{2,n}} = \sqrt{(x_{S_n} - x_{TX2})^2 + (y_{S_n} - y_{TX2})^2 + (z_{S_n} - z_{TX2})^2},$$

$$D_{RX_{1,n}} = \sqrt{(x_{RX1} - x_{S_n})^2 + (y_{RX1} - y_{S_n})^2 + (z_{RX1} - z_{S_n})^2},$$

$$D_{RX_{2,n}} = \sqrt{(x_{RX2} - x_{S_n})^2 + (y_{RX2} - y_{S_n})^2 + (z_{RX2} - z_{S_n})^2}.$$

Предполагается, что за время оценки параметров канала его характеристики не меняются.

Расчет корреляционной матрицы канальных коэффициентов

Рассмотрим корреляционную матрицу канальных коэффициентов при размещении одного рассеивателя на поверхности эллипсоида в соответствии со сценарием Е стандарта COST259. Выражение для канального коэффициента передачи сигнала между отдельными элементами антенных системы с учетом одного рассеивателя имеет вид:

$$\mathbf{H} = \left\{ h_{TX_k, RX_l} = L_{TX_{k,n}} L_{RX_{l,n}} e^{\frac{j2\pi(D_{TX_{k,n}} + D_{RX_{l,n}})}{\lambda} + j\phi_n} \right\},$$

$$k = 1, \dots, N_{TX}, l = 1, \dots, N_{RX}.$$

По результатам расчета матрицы канальных коэффициентов можно рассчитать их корреляционную матрицу: $\mathbf{R} = \text{vec}(\mathbf{H})\text{vec}(\mathbf{H})^H$, где $\text{vec}(\mathbf{H})$ – векторизованная матрица канальных коэффициентов.

Корреляционная матрица при заданных угловых направлениях на выбранный n -й рассеиватель обозначается $\mathbf{R}(\beta_S, \gamma_S)$. При известной функции распределения рассеивателей на поверхности эллипсоида $f(\beta_S, \gamma_S)$ общая корреляционная матрица имеет вид:

$$\mathbf{R}_{\beta\gamma} = \int_0^{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \mathbf{R}(\beta_S, \gamma_S) f(\beta_S, \gamma_S) d\beta_S d\gamma_S.$$

При равномерном распределении рассеивателей по объему эллипсоида выражение для распределения угловых направлений на отражатели имеет вид [4]:

$$f(\beta_S, \gamma_S) = \frac{2b^5 c^2 \sin \beta_S}{\pi a (2a \sqrt{b^2 \sin^2 \beta_S + c^2 \cos^2 \beta_S} + cD \sin \beta_S \cos \gamma_S)^3},$$

где a, b, c – длины полуосей эллипсоида.

Графики зависимости дисперсии R_{11} канального коэффициента от угла поворота рассеивателей вокруг оси Оу (рис. 7), полученные по результатам расчета, имеют экстремум в направлении большей полуоси эллипсоида. Данный факт объясняется уменьшением области максимальной плотности рассеивателей.

В пределах объема рассматриваемого эллипсоида формируются отдельные поверхности, соответствующие определенному времени задержки сигнала τ при распространении от передатчика до приемника. Выполнено моделирование положений рассеивателей с гауссовским распределением по углу места при $\sigma_\beta = 1$ и равномерным распределением по азимуту. Выполнен расчет дисперсии канальных коэффициентов путем моделирования распространения сигнала при различных сценариях расположения рассеивателей в соответствии со стандартом COST259. Рассмотрим зависимость дисперсии корреляционной матрицы MIMO канала связи при различных углах поворота сферы рассеивателей относительно оси Оу. Первоначально область наибольшей плотности рассеивателей располагается вокруг точки с координатами $(0, 0, r)$, где r – радиус рассмат-

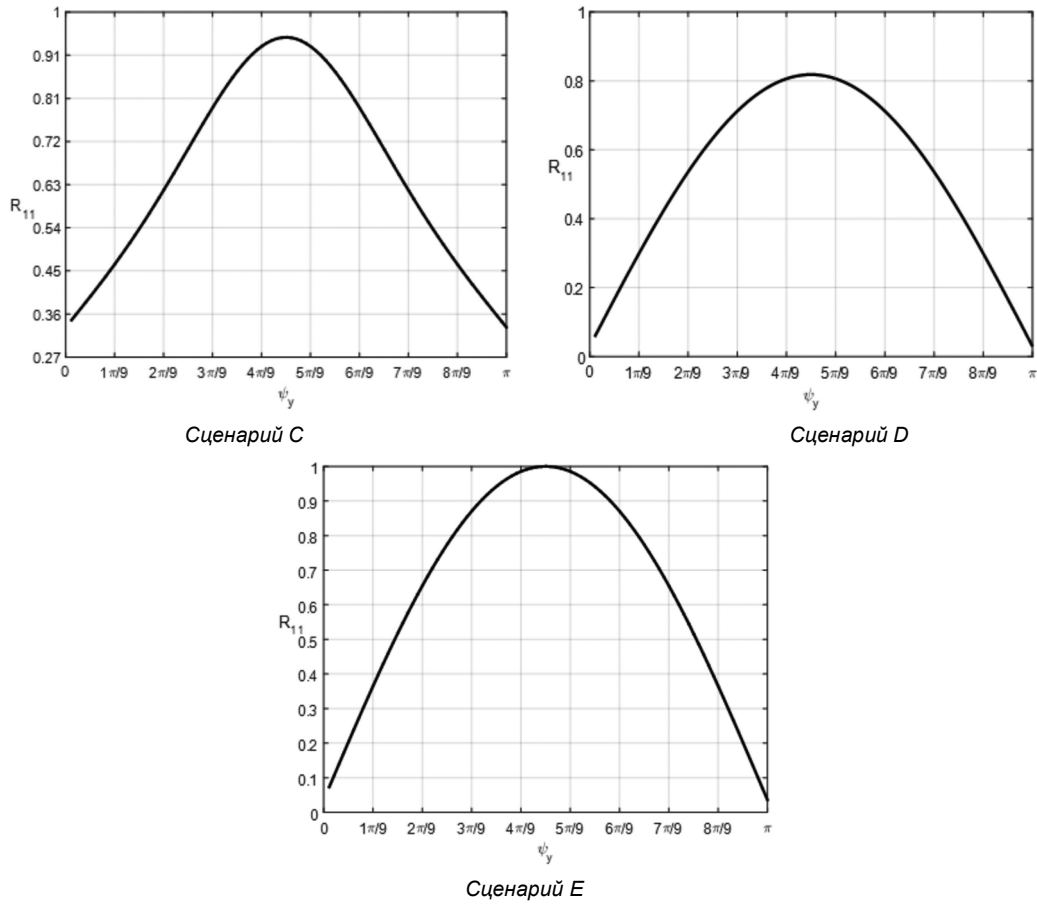


Рис. 7. Зависимость первого элемента корреляционной матрицы от угла поворота в разных сценариях

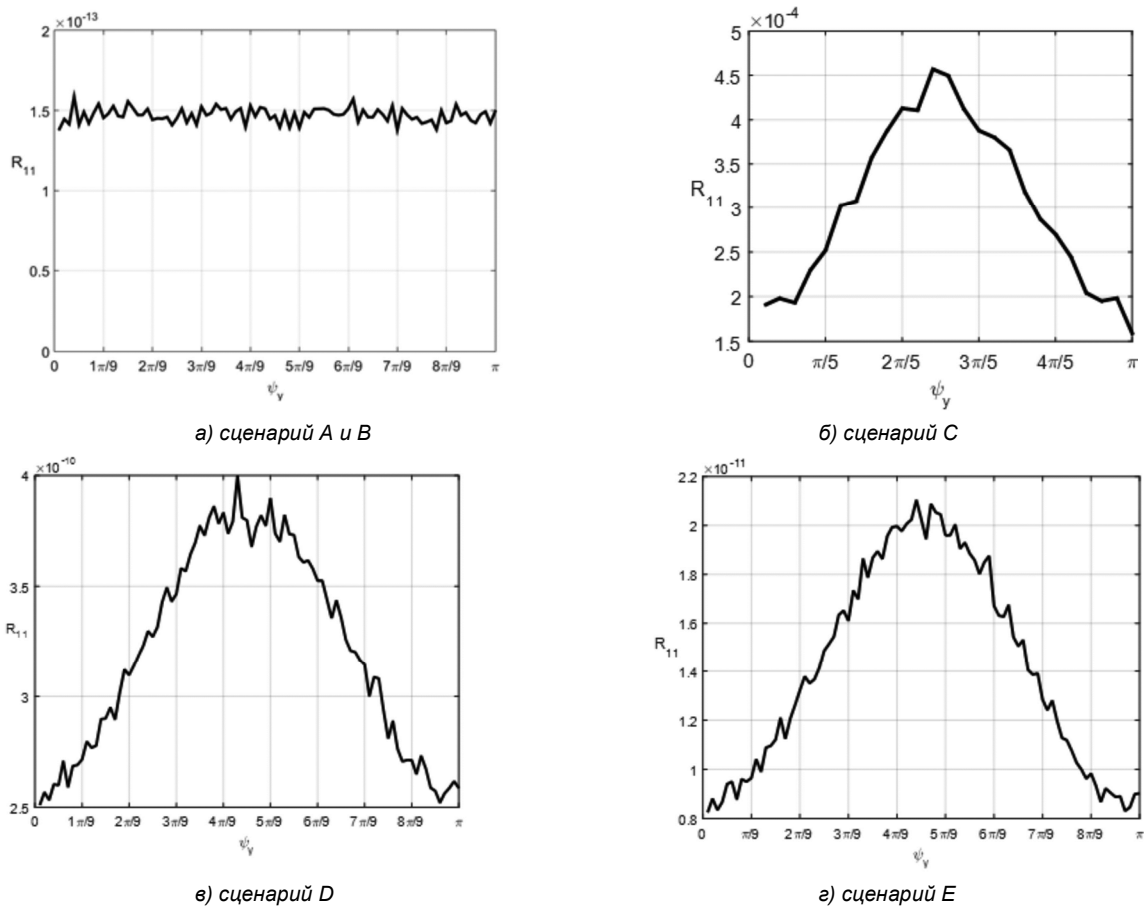


Рис. 8. Зависимость первого элемента корреляционной матрицы от угла поворота в разных сценариях

Сценарии COST259				
А	В	С	Д	Е
Эллиптическая трехмерная модель расположения рассеивателей (a, b, c – длины полуосей эллипсоида)			Эллиптическая двумерная модель расположения рассеивателей (a, b – длины полуосей эллипса)	
Распределение рассеивателей по объему			Распределение рассеивателей по поверхности	
Равномерное	Гауссовское	Равномерное	Гауссовское	Релеевское

Рис. 9. Классификация каналов связи

риваемой сферы. Поворот выполняется в положительном направлении от 0 до π вокруг оси Оу.

На рис. 8 приведены зависимости дисперсии канального коэффициента для различных сценариев расположения рассеивателей в соответствии со стандартом COST259.

Результаты моделирования показывают, что коэффициенты корреляционной матрицы мало меняются при повороте сферы рассеивателей по сценарию А и В модели COST259 (рис. 7, а). Распределение рассеивателей по эллипсоиду между передающим и приемным устройством в соответствии со сценариями С и Д приводит к формированию максимума коэффициента корреляции в направлении на передающее устройство. Поворот координат рассеивателей по эллипсоиду вокруг оси Оу в соответствии со сценарием Е приводит к значительному изменению коэффициента корреляционной матрицы с максимумом при расположении рассеивателей на поверхности эллипсоида вблизи приемного или передающего устройств.

На основании полученных результатов предложена классификация каналов связи при использовании трехмерных моделей (рис. 9).

Заключение

Проведено исследование трехмерной геометрической модели ММО канала связи при равномерном распределении рассеивателей по объему и гауссовском распределении рассеивателей по поверхности сферы и эллипсоида. Проводимое моделирование согласуется со сценариями расположения рассеивателей по стандарту COST259. При фиксированном расположении приемного и передающего устройства полученные зависимости дисперсии канальных коэффициентов от угла поворота координат рассеивателей можно интерпретировать как угловой спектр антенной системы. При дальнейшем исследовании предполагается рассмотреть влияние параметров антенной системы на корреляционную матрицу канальных коэффициентов при различных сценариях расположения рассеивателей, а также учесть потери сигнала в среде и при прохождении препятствий.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, грант РНФ 22-29-01652, <https://rscf.ru/en/project/22-29-01652/> в Рязанском государственном радиотехническом университете имени В.Ф. Уткина.

Литература

1. Флакман А.Г. Адаптивная пространственная обработка сигналов в многоканальных информационных системах: специальность 01.04.03 «Радиофизика»: дис. на соискание ст. докт. физ.-мат. наук / Флакман Александр Григорьевич: Нижегородский государственный университет им.

Н.И. Лобачевского. Нижний Новгород, 2004. 306 с.

2. Паршин Ю.Н. Анализ пропускной способности канала передачи информации от беспилотного летательного аппарата при неточной канальной матрице / Ю.Н. Паршин, В.И. Кудряшов. Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2015. № 52. С. 19-24.

3. Nawaz S.J. 3-D Gaussian scatter density propagation model employing a directional antenna at BS / S.J. Nawaz, M.N. Patwary, N.M. Khan, H.Yu. 2010 5th Advanced Satellite Multimedia Systems Conference and the 11th Signal Processing for Space Communications Workshop. 2010, pp 395-400.

4. Alsehaili, M. Angle of arrival statistics of a three-dimensional geometrical scattering channel model for indoor and outdoor propagation environments / M. Alsehaili, S. Nog-hanian, D. A. Buchan-an, A. R. Sebak. IEEE Progress in Electromagnetic Research. 2010, vol. 109, pp 191-209.

5. Tennakoon P. Three-dimensional geometrical channel modeling with different scatterer distributions / P. Tenna-koon, C.B. Wavegedara. The International Conference on Advances in Computing, Communications and Informatics (ICACCI). 2015, pp 154-160. Eason, B. Noble, and I.N. Sneddon, «On certain integrals of Lipschitz-Hankel type involving products of Bessel functions», Phil. Trans. Roy. Soc. London, vol. A247, pp. 529-551, April 1955.

6. Liberti, J.C. A geometrically based model for line of sight multipath radio channels / J.C. Liberti, T. S. Rappaport. IEEE Vehicular Technology Conf., 844-848, Apr. 1996.

7. Aslam, M.I. Joint and marginal probabilities for time of arrival and angle of arrival using ellipsoidal model / M.I. Aslam, A.Z. Shaikh. 2013 3rd IEEE International Conference on Computer, Control and Communication (IC4).

8. Patzold, M. A space-time channel simulator for MIMO channels based on the geometrical scattering model / M. Patzold, B. O. Hogstad. Wireless Communications and Mobile Computing. Special Issue on Multiple-Input Multiple-Output (MIMO) Communications. Nov. 2004, vol. 4. № 7, pp. 727-737.

9. 3GPP TR 25.943 version 9.0.0 Release 9 Deployment aspects (Release 17) ETSI TR 125 943 V9.0.0. 2022.

10. Паршин Ю.Н. Программно-аппаратный комплекс тестирования канальной матрицы ММО системы передачи информации от подвижного объекта / Ю.Н. Паршин, П.В. Жариков, П.А. Казначеев. Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. Рязань: РГРТУ. 2015, №4, вып. 54, часть 1, с. 3-8.

11. Паршин Ю.Н. Исследование влияния ширины спектра случайного тестового сигнала на точность оценивания комплексного коэффициента передачи каналов радиотракта / Ю.Н. Паршин, П.В. Жариков. Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. Рязань: РГРТУ. 2010. №1, вып. 31. с. 16-19.

12. Паршин Ю.Н. Влияние пространственной корреляции на эффективность оптимизации пространственной структуры многоантенной системы при разнесенном приеме / Ю.Н. Паршин, А.В. Ксендзов. Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. Рязань: РГРТУ, 2006, вып. 19, с. 54-62.