

КОРРЕЛЯЦИОННЫЕ СВОЙСТВА КАНАЛЬНЫХ КОЭФФИЦИЕНТОВ МИМО СИСТЕМЫ СВЯЗИ С МАНЕВРИРУЮЩИМ ОБЪЕКТОМ

*Паршин Ю.Н., д.т.н., проф., заведующий кафедрой РТУ РГПТУ, e-mail: parshin.y.n@rsreu.ru;
Кудряшов В.И., аспирант кафедры РТУ РГПТУ, e-mail: yachmen@mail.ru.*

CORRELATION PROPERTIES OF MIMO COMMUNICATION SYSTEM CHANNEL COEFFICIENTS WITH MANEUVERING OBJECT

Parshin Y.N., Kudryashov V.I.

The analysis of the correlation coefficients of the MIMO channel communication system with maneuvering objects indispensable to the development of optimal algorithms for estimating channel coefficients for different models of maneuvering motion of the object is performed. The results allow reasonable estimation algorithm selected channel coefficients, which reduces the error of estimation.

Key words: MIMO channel, matrix of channel coefficients, maneuvering object, measurement error, correlation analysis.

Ключевые слова: МИМО канал, матрица канальных коэффициентов, маневрирующий объект, ошибка измерения, корреляционный анализ.

Введение

В настоящее время наблюдается интенсивный рост применения маневрирующих объектов, например, беспилотных аппаратов (БПА) для получения и передачи информации. В этом случае к пропускной способности канала связи предъявляются высокие требования. Для повышения скорости передачи данных в условиях замираний и многолучевости в системах связи с БПА применяют технологию МИМО. Канал передачи данных построенный на основе данной технологии обеспечивает высокую пропускную способность за счет пространственно-временного кодирования и декодирования с использованием нескольких антенн на приемной и передающей стороне.

Одной из проблем применения МИМО каналов для связи с маневрирующими объектами является большая вариабельность во времени матрицы канальных коэффициентов (МКК) при движении объекта. В работах [1, 2] проведен анализ влияния ошибок измерения МКК на пропускную способность МИМО канала связи. Установлено, что движение объекта вызывает дополнительную динамическую ошибку оценивания МКК. Поэтому важно определить характер изменения канальных коэффициентов МИМО системы передачи информации в различных типовых условиях.

Целью работы является анализ корреляции канальных коэффициентов МИМО системы связи с маневрирующим объектом, необходимый для разработки оптимальных алгоритмов оценивания МКК, при различных моделях движения маневрирующего объекта.

Постановка задачи. В статье используются различные модели движения маневрирующего объекта.

Модель № 1. В качестве одной из математических моделей движения может быть принята модель Дубинса [3].

Проводится анализ корреляции канальных коэффициентов МИМО системы связи с маневрирующим объектом, необходимый для разработки оптимальных алгоритмов оценивания канальных коэффициентов, при различных моделях движения маневрирующего объекта. Получены результаты, позволяющие обоснованно выбрать алгоритм оценивания канальных коэффициентов, что уменьшает ошибку оценивания.

са [3]. Данная модель описывает детерминированное движение объекта в непрерывном времени, обеспечивающее оптимальное по быстродействию движение и управление: кратчайший путь, соединяющий две точки в двумерной евклидовой плоскости с ограничением на кривизну траектории.

В работе [3] показано, что любой траектория Дубинса состоит из дуг окружности максимального радиуса кривизны поворота и (или) прямых отрезков. В случае двумерной модели, объект перемещается по плоскости и именуется машиной Дубинса, которая широко используется в качестве одной из базовых моделей движения маневрирующего аппарата. Движение такого объекта описывается следующей системой уравнений в дискретном времени:

$$\begin{aligned}x_n &= x_{n-1} + \Delta t V_{n-1} \cos \theta_{n-1}, \\y_n &= y_{n-1} + \Delta t V_{n-1} \sin \theta_{n-1}, \\ \theta_n &= \theta_{n-1} + \Delta t u,\end{aligned}\tag{1}$$

где $(x, y) \in \mathbb{R}^2$ – координаты базисной точки объекта на плоскости, θ_n – угол между осью абсцисс и вектором скорости объекта, u – угловая скорость объекта, V_n – линейная скорость объекта в собственной системе координат, Δt – дискрет изменения времени.

В работе [4] представлена дискретная модель Дубинса, в которой траектория движения БПА аппроксимируется отрезками прямой. Приводится доказательство того, что кратчайшие полигональные пути с ограниченной кривизной поворота объекта имеют такую же структуру, как и у путей Дубинса.

Модель № 2. Описанная выше модель является детерминированной, т.е. в ней отсутствует случайная составляющая движения. В работе [5] предлагается для учета флуктуаций управляющих воздействий и турбулентности среды движения ввести шумовую составляющую в некоторые параметры модели движения. Например, в системе уравнений такими параметрами могут быть линейная скорость V , угловая скорость u . Уравнения, описывающие флуктуации этих параметров в дискретном времени имеют вид:

$$V_n = \left(1 - \frac{\Delta t}{T_V}\right) V_{n-1} + \frac{k_1}{T_V} \delta_n, \quad (2)$$

где коэффициенты T_V, k_1 характеризуют скорость и интенсивность флуктуаций, δ_n – стандартный белый шум. Уравнение для угловой скорости имеет аналогичный вид с учетом обозначений.

Модель № 3. В работе [6] приведены уравнения движения маневрирующего объекта, записанных в виде переменных состояния. Невозмущенная траектория объекта задается уравнением в дискретном времени:

$$\mathbf{x}_n = \Phi \mathbf{x}_{n-1}, \quad (3)$$

где $\mathbf{x}_n = \left\{ x_n, \frac{dx_n}{dt}, y_n, \frac{dy_n}{dt} \right\}$ – координаты объекта и их первые производные,

$$\Phi = \begin{pmatrix} 1 & \Delta t & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \Delta t \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

Неманеврирующий объект имеет приблизительно постоянную скорость, которая незначительно флуктуирует. Уравнение движения неманеврирующего объекта на плоскости содержит случайные возмущения в виде белого шума $\boldsymbol{\eta}_n = \{\eta_1, \eta_2\}$:

$$\mathbf{x}_n = \Phi \mathbf{x}_{n-1} + \mathbf{B} \boldsymbol{\eta}_n, \quad (4)$$

где $\mathbf{B} = \begin{pmatrix} \Delta t / 2 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & \Delta t / 2 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}.$

Маневрирующий объект имеет приблизительно постоянное ускорение, которое незначительно флуктуирует:

$$\mathbf{x}_n = \left\{ x_n, \frac{dx_n}{dt}, y_n, \frac{dy_n}{dt}, \frac{d^2 x_n}{dt^2}, \frac{d^2 y_n}{dt^2} \right\}.$$

Коэффициенты уравнения для маневрирующей цели имеют вид:

$$\Phi = \begin{pmatrix} 1 & \Delta t & 0 & 0 & \Delta t^2 / 2 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & \Delta t & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \Delta t & 0 & \Delta t^2 / 2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & \Delta t \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix},$$

$$\mathbf{B} = \begin{pmatrix} \Delta t^2 / 4 & 0 \\ \Delta t / 2 & 0 \\ 0 & \Delta t^2 / 4 \\ 0 & \Delta t / 2 \\ 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

Разработаны также модели движения [7], более точно отражающие движение объекта, учитывающие его свойства управляемости а также турбулентность воздушных масс. Однако, большой объем априорных сведений, необходимых для расчета траектории движения, затрудняют их применение и получение общих результатов.

Модель распространения сигнала. Описание распространения сигнала в MIMO канале основано на геометрической однокольцевой модели отражения (рис. 1) [8].

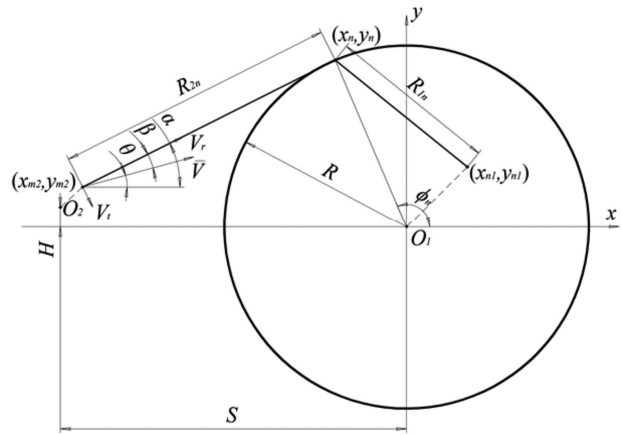


Рис. 1. Однокольцевая геометрическая модель

Прохождение сигнала от передающей антенны к приемной антенне можно представить в виде линейного преобразования амплитуды и фазы сигнала. Комплексные коэффициенты преобразования образуют каналную матрицу

$$\underline{\mathbf{H}} = \{ \underline{H}_{im} = H_{im} e^{j\psi_{im}}, i = 1, \dots, N_R, m = 1, \dots, N_T \},$$

где H_{im} – коэффициент передачи амплитуды сигнала, ψ_{im} – фазовый сдвиг сигнала, N_R, N_T – число приемных и передающих антенн соответственно.

Наземная антенная система работает в режиме приема и содержит N_R элементов с координатами x_{n1}, y_{n1} в системе координат O_1 , связанной с наземной антенной системой. Антенная система маневрирующего объекта работает в режиме передачи и содержит N_T элементов с координатами $x_{m2}, y_{m2}, m = 1, \dots, N_T$, в системе координат O_2 , связанной с маневрирующим объектом. Начало системы координат O_2 располагается в точке (S, H) , характеризующей положение маневрирующего объекта, а ее зависимость от времени задает траекторию его движения. Каждый из отражателей располагается на окружности радиусом R с центром в точке O_1 ; координаты отражателей равны: $x_n = R \cos \phi_n, y_n = R \sin \phi_n$. Угловая координата отражателей $\phi_n = n \frac{2\pi}{N}, n = 1, \dots, N$, соответствует

равномерному распределению отражателей по окружности, N – количество отражателей.

В соответствии с принятой моделью коэффициент канальной матрицы определяется следующим выражением:

$$\underline{H}(t) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{n=1}^N a_n b_n e^{j(2\pi f_n t + \theta_n)}, \quad (6)$$

где $a_n = e^{j2\pi \frac{R_{1n}}{\lambda}}$ – коэффициент, определяющий сдвиг фазы сигнала на участке от передающих антенн

до одного из отражателей; $b_n = e^{j2\pi \frac{R_{2n}}{\lambda}}$ – коэффициент, определяющий сдвиг фазы сигнала на участке от кольца отражателей до приемной антенны,

$R_{1n} = \sqrt{(x_n - x_1)^2 + (y_n - y_1)^2}$ – расстояние от приемной антенны до одного из отражателей,

$R_{2n} = \sqrt{(x_n - x_2 - S)^2 + (y_n - y_2 - H)^2}$ – расстояние от передающей антенны до одного из отражателей,

$\lambda = c / f_0$ – длина волны. Доплеровский сдвиг частоты определяется радиальной составляющей скорости движения БПА в направлении на НПУ $f_n = f_{\max} \cos \beta$ – значение доплеровского сдвига для n -го отражателя,

$$\cos \beta = \frac{(x_n - x_2 - S) \cos \theta - (y_n - y_2 - H) \sin \theta}{\sqrt{(x_n - x_2 - S)^2 + (y_n - y_2 - H)^2}},$$

$f_{\max} = Vf_0 / c$ – максимальное значение доплеровского сдвига частот, V – скорость движения маневрирующего объекта, $c = 3 \times 10^8$ м/с – скорость распространения радиоволн.

Сдвиги фазы θ_n , вносимые каждым отражателем, являются независимыми одинаково распределенными случайными величинами с равномерным законом распределения на интервале $[0, 2\pi)$, причем при расчете всех канальных коэффициентов значения фазы считаются постоянными. Затухание амплитуды сигнала при прохождении от передатчика к отражателю, от отражателя к приемнику, а также при отражении в при расчете нормированной корреляционной функции несущественны.

При оценивании канальных коэффициентов и пропускной способности ММО системы передачи информации важное значение имеет характер изменения канальных коэффициентов во времени. В наиболее общем виде эти изменения задаются корреляционной функцией каждого из коэффициентов, отражающей скорость изменения во времени и особенности изменений модуля и аргумента комплексных канальных коэффициентов:

$$R_{ijmn}(\tau) = \frac{\mathbf{M}\{\underline{H}_{ij}(t) \underline{H}_{mn}^*(t + \tau)\}}{\sqrt{\mathbf{M}\{|\underline{H}_{ij}(t)|^2\} \mathbf{M}\{|\underline{H}_{mn}(t + \tau)|^2\}}}. \quad (7)$$

Корреляционные функции определяются различным образом в зависимости от особенностей формирования канальных коэффициентов.

Экспериментальные исследования. Для оценки корреляционной функции канальных коэффициентов ММО системы связи $R_{ijmn}(\tau)$ проведено компьютерное моделирование. Условия проведения моделирования: радиус кольца отражателей $R = 50$ м, интервал дискре-

тизации во времени $\Delta t = 1$ мкс, количество отражателей $N = 60$, центральная частота передатчика $f_0 = 2,4$ ГГц, начальные расстояния от передающих до приемных антенн по осям $S = 1000$ м, $H = 100$ м, начальная скорость движения объекта $V = 50$ м/с. Усреднение при вычислении корреляционной функции (7) происходит по $N_{st} = 1000$ реализациям.

Рассчитаны корреляционные функции канальных коэффициентов при различных моделях движения объекта. Если движение объекта имеет детерминированный характер, например, описывается моделью Дубинса или более простыми полиномиальными моделями, а фазы отраженных от элементарных отражателей можно считать постоянными на заданном временном интервале, то характер изменения канальных коэффициентов также детерминированный. Источниками случайных возмущений канальных коэффициентов являются начальные фазы элементарных отражателей θ_n , которые изменяют свое значение при каждом эксперименте. Данная модель справедлива, если перемещение объекта за время τ незначительно, а ракурс визирования элементарных отражателей изменяется настолько незначительно, что не приводит к существенному изменению коэффициента рассеяния.

На рис. 2 представлен модуль корреляционной функции канального коэффициента при прямолинейном равномерном движении объекта. В данном случае корреляция канального коэффициента сохраняется на уровне 90% при $\tau = 7$ мс.

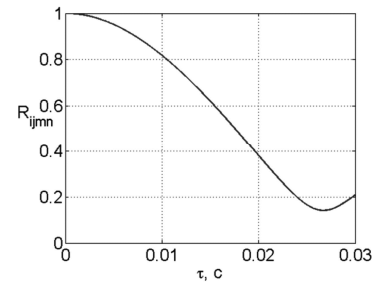


Рис. 2. Зависимость усредненного значения корреляции от времени движения объекта при прямолинейном равномерном движении

На рис. 3 приведен модуль корреляционной функции канального коэффициента при движении объекта по траектории Дубинса. По сравнению со случаем равномерного прямолинейного движения, показанным на рис. 2, при движении по траектории Дубинса корреляция на уровне 90% сохраняется на значительно меньшем временном интервале $\tau = 0,2$ мс.

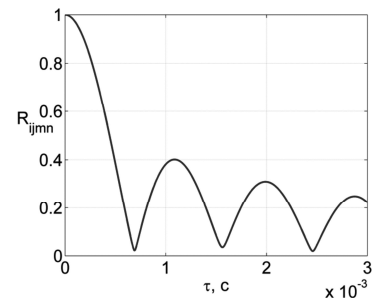


Рис. 3. Корреляционная функция при движении объекта по траектории Дубинса

Если движение объекта имеет детерминированный характер, но перемещение объекта за время τ достаточно велико, то можно считать фазы отраженных от элементарных отражателей случайными, независимыми при различных значениях τ . На рис. 4 представлен модуль корреляционной функции канального коэффициента при прямолинейном равномерном движении объекта и случайных фазах отражателей. В данном случае, из-за постоянного изменения фаз отражателей элементы МКК становятся некоррелированными между собой, что не позволяет применять экстраполяцию значений коэффициентов в последующие моменты времени.

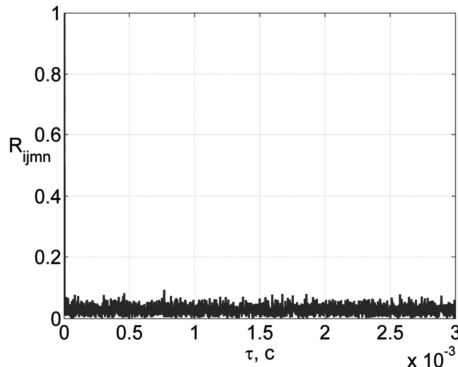


Рис. 4. Корреляционная функция

при прямолинейном равномерном движении объекта и случайных фазах отражателей

Если движение объекта имеет случайный характер, задаваемый возмущениями траектории в соответствии с моделями 1 и 2, то это необходимо учитывать при вычислении корреляционной функции методом статистического моделирования. В этом случае фазы отраженных от элементарных отражателей сигналов также могут быть постоянными при разных задержках во времени или независимыми при различных значениях задержки. На рис. 5 представлена модуль корреляционной функции канального коэффициента при прямолинейном движении объекта с флюктуацией скорости.

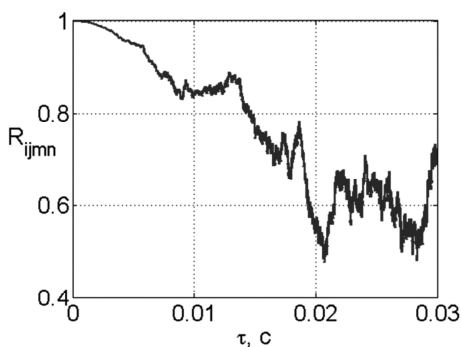


Рис. 5. Корреляционная функция

при прямолинейном движении объекта с флюктуацией скорости

На рис. 6 представлена модуль корреляционной функции канального коэффициента при движении объекта по траектории Дубинса с флюктуацией скорости.

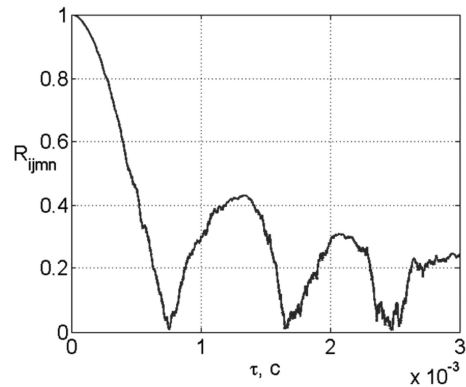


Рис. 6. Корреляционная функция при движении объекта по траектории Дубинса с флюктуацией скорости

По сравнению со случаями, показанными на рис. 2 и рис. 3, при движении объекта с флюктуацией скорости корреляция на уровне 90% сохраняется.

Исследования выполнены при поддержке гранта Российского научного фонда, проект № 14-19-01263 в Рязанском государственном радиотехническом университете.

Литература

1. Ermolayev V.T., Flaksman A.G., Kovalyov I.P., Averin I.M. Weight Error Loss in MIMO Systems Using Eigenchannel Technique // Proceedings of the 1st International Conference on Antenna Theory and Techniques (ICATT'03). Sevastopol, Ukraine. 2003. – P.333–336.
2. Паршин Ю.Н., Кудряшов В.И. Анализ пропускной способности канала передачи информации от беспилотного летательного аппарата при неточной канальной матрице // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. – 2015. – № 52. – С. 19–24.
3. Dubins L. E. On curves of Minimal Length with a Constraint on Average Curvature, and with Prescribed Initial and Terminal Positions and Tangents // American Journal of Mathematics. – 1957. – V. 79. – №. 3 – P. 497–516.
4. Eriksson-Bique, S.D., Kirkpatrick, D.G., Polishchuk, V. Discrete Dubins paths. CoRR, abs/1211.2365 (2012).
5. Кондратьев, В. С. Многопозиционные радиотехнические системы / В. С. Кондратьев, А. Ф. Котов, Л. Н. Марков. – М.: Радио и связь, 1986. – 264 с.
6. Кузьмин, С. З. Цифровая радиолокация. Введение в теорию / С. З. Кузьмин. – Киев. Издательство, 2000. – 428 с.
7. Cook, M. V. Flight dynamics principles. London, Arnold; New York, Wiley, 1997. – 379 p.
8. M. Patzold, B. O. Hogstad. A Space-Time Channel Simulator for MIMO Channels Based on the Geometrical One-Ring Scattering Model // Wireless Communications and Mobile Computing. Special Issue on Multiple-Input Multiple-Output (MIMO) Communications. – Nov. 2004. – V4. – №. 7. – P. 727–737.