



СИСТЕМЫ КООРДИНАТ PHASED ARRAY SYSTEM TOOLBOX ДЛЯ УЧЕБНОГО КУРСА «ТЕХНОЛОГИИ УМНЫХ АНТЕНН 5G»

Г. А. Фокин

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций
им. проф. М. А. Бонч-Бруевича,
Санкт-Петербург, 193232, Российская Федерация
Адрес для переписки: grihafokin@gmail.com

Аннотация—В области технологий умных антенн особого внимания заслуживают подходы, основанные на имитационном моделировании в специальном программном обеспечении Matlab, включая пакет расширения Phased Array System Toolbox. Данный пакет обеспечивает реализацию алгоритмов и методов для моделирования антенных решеток и систем диаграммообразования в различных приложениях, в том числе, в системах радиосвязи, радиолокации и радионавигации. Используя возможности данного пакета расширения, можно анализировать показатели функционирования активных и пассивных антенных решеток различных геометрических конфигураций, включая сложные антенные решетки, образованные из составных массивов элементов. Построенные с данным пакетом расширения имитационные модели позволяют осуществлять формирование и обработку сигналов с использованием моделей и методов диаграммообразования при работе на передачу и прием. Для сетей подвижной связи LTE и 5G NR, спутниковых систем и беспроводных локальных сетей WLAN пакет расширения PAST позволяет моделировать многолучевые антенные решетки, в том числе, работающие в режиме адаптивного диаграммообразования. Пакет расширения включает модели алгоритмов цифрового и гибридного диаграммообразования, функционирующих в составе систем пространственного обработки сигналов massive MIMO в диапазоне миллиметровых волн. Возможности моделирования в пакете расширения включают, в том числе, воспроизведение условий замираний в многолучевом радиоканале и оценку их влияние на системы связи с AP; алгоритмы и методы определения направления прихода сигнала DOA. В настоящей работе выполняется обзор систем координат, используемых в пакете расширения PAST. **Предмет исследования.** Статья посвящена обзору пакета расширения PAST для использования в новом учебном курсе «Технологии умных антенн 5G». **Метод.** Исследование возможностей пакета расширения PAST проводится методом имитационного моделирования. **Основные результаты.** Результатом настоящей работы является обзор систем координат программного инструментария пакета расширения PAST для использования в новом учебном курсе «Технологии умных антенн 5G». **Практическая значимость.** Проведенный обзор знакомит с возможностями пакета расширения PAST и является фундаментом методического обеспечения в области реализации алгоритмов и методов моделирования антенных решеток и систем диаграммообразования в рамках нового учебного курса «Технологии умных антенн 5G».

Ключевые слова—5G, Phased Array System Toolbox, антенные решетки, диаграммообразование, система координат, умные антенны.

Информация о статье

УДК 621.396.677

Язык статьи – русский.

Поступила в редакцию 17.10.2022, принята к печати 27.12.2022.

Для цитирования: Фокин Г. А. Системы координат Phased Array System Toolbox для учебного курса «Технологии умных антенн 5G» // Информационные технологии и телекоммуникации. 2022. Том 10. № 4. С. 38–58. DOI 10.31854/2307-1303-2022-10-4-38-58.



PHASED ARRAY SYSTEM TOOLBOX PACK OVERVIEW FOR NEW COURSE «5G SMART ANTENNAS TECHNOLOGIES»

G. Fokin

The Bonch-Bruевич Saint-Petersburg State University of Telecommunications,
St. Petersburg, 193232, Russian Federation

Corresponding author: grihafokin@gmail.com

Abstract—In the field of smart antenna technologies, approaches based on simulation modeling in special Matlab software, including the Phased Array System Toolbox extension package, deserve special attention. This package provides the implementation of algorithms and methods for modeling antenna arrays (AA) and beamforming (BF) systems in various applications, including radio communication, radar and radio navigation systems. Using the capabilities of this extension package, you can analyze the performance of active and passive AAs of various geometric configurations, including complex AAs formed from composite arrays of elements. The simulation models built with this expansion package allow the formation and processing of signals using models and methods of beamforming, when working on transmission and reception. For LTE and 5G NR mobile networks, satellite systems and WLANs, the PAST extension package allows modeling multipath AAs, including those operating in the adaptive BF mode. The extension package includes models of digital and hybrid BF algorithms that operate as part of massive MIMO spatial signal processing systems in the mmWave. Simulation capabilities in the extension package include, but are not limited to, reproducing fading conditions in a multipath radio channel and evaluating their impact on communication systems with an AP; algorithms and methods for determining signal direction of arrival (DOA). In this paper, we review the coordinate systems used in the PAST extension package. **Subject of study.** The article is devoted to an overview of the PAST extension package for use in the new 5G Smart Antenna Technologies training course. **Method.** The study of the possibilities of the PAST extension package is carried out by the simulation. **Main results.** The result of this work is an overview of the coordinate systems in basic software tools of the PAST extension package for use in the new course "5G Smart Antenna Technologies". **Practical significance.** This review introduces the capabilities of the PAST extension package and is the foundation of methodological support in the implementation of algorithms and methods for modeling antenna arrays and beamforming systems within the framework of the new training course "5G Smart Antenna Technologies".

Keywords—5G, Phased Array System Toolbox, antenna arrays, beamforming, coordinate system, smart antennas.

Article info

Article in Russia.

Received 17.10.2022, accepted 27.12.2022.

For citation: Fokin G.: Phased Array System Toolbox Pack Overview for New Course «5G Smart Antennas Technologies» // Telecom IT. 2022. Vol. 10. Iss. 4. pp. 38–58. DOI 10.31854/2307-1303-2022-10-4-38-58.



1 Модели сигналов в Phased Array System Toolbox

В пакете расширения Phased Array System Toolbox (PAST)^{1,2,3,4} предусмотрена возможность работы как с непрерывными, так и с импульсными сигналами.

Комплексные baseband сигналы. В пакете расширения Phased Array System Toolbox при пространственно-временной обработке используются модели комплексных сигналов (*baseband*-сигналов). На передающей стороне при модуляции информационного baseband-сигнала из области нулевых (информационных) частот на несущую радиочастоту с получением bandpass-сигнала используется квадратурный модулятор с переносом по частоте вверх. Обычно, ширина полосы частот модулируемого сигнала значительно ниже несущей радиочастоты, поэтому говорят об узкополосных системах радиосвязи. На приемной стороне при демодуляции bandpass-сигнала с несущей радиочастоты в область нулевых частот используется квадратурный демодулятор с переносом по частоте вниз. В результате демодуляции получается комплексный baseband-сигнал типа $I + jQ$, образованный синфазной I и квадратурной Q составляющими. При имитационном моделировании (ИМ) процедур формирования, передачи, приема и обработки сигналов в пакете расширения PAST используются комплексные baseband-сигналы. На передающей стороне с элементов антенных решеток (АР) излучаются вещественные сигналы; комплексные baseband-сигналы $I + jQ$ получаются на приемной стороне. Однако при построении имитационных моделей можно использовать модели комплексных baseband сигналов как при передаче, так и при приеме.

Представление комплексных baseband сигналов. При пространственной (ПОС) и пространственно-временной обработке сигналов (ПВОС) в пакете расширения PAST для представления комплексных baseband сигналов используются трехмерные массивы.

Пространственные координаты. Представление местоположения (МП) устройства-платформы и элемента АР в пространстве является определяющим для имитационного моделирования процедур пространственно-временной обработке сигналов. В пакете расширения PAST используются прямоугольная и сферическая системы координат (СК); координаты представляются вектором столбцом относительно начала глобальной и локальной систем координат.

Единицы измерения и константы. В сферической СК пакета расширения PAST для измерения углов используются градусы; для перевода из радианов в градусы и наоборот используются функции `rad2deg` и `deg2rad`. Для перевода мощности из дБ(Вт) в Вт и наоборот используются функции `db2pow` и `pow2db`. Для перевода магнитуды из логарифмических единиц дБ в линейные и наоборот

¹ Phased Array System Toolbox. MathWorks. URL: <https://www.mathworks.com/products/phased-array.html> (дата обращения: 29.09.2022).

² Phased Array System Toolbox. Getting Started Guide. MathWorks. URL: https://www.mathworks.com/help/pdf_doc/phased/phased_gs.pdf (дата обращения: 29.09.2022).

³ Phased Array System Toolbox. User's Guide. MathWorks. URL: https://www.mathworks.com/help/pdf_doc/phased/phased_ug.pdf (дата обращения: 29.09.2022).

⁴ Phased Array System Toolbox. Reference. MathWorks. URL: https://www.mathworks.com/help/pdf_doc/phased/phased_ref.pdf (дата обращения: 29.09.2022).



используются функции `db2mag` и `mag2db`. В PAST используются следующие константы: скорость света в вакууме 'LightSpeed' $c = 299792458$ м/с; постоянная Больцмана 'Boltzmann' $k = 1,3806504 \cdot 10^{-23}$ Дж/К; средний радиус Земли 'EarthRadius' 6371000 м.

2 Системы координат в Phased Array System Toolbox

2.1 Прямоугольная система координат

Прямоугольная СК образована тремя взаимно перпендикулярными осями. Рис. 1 иллюстрирует один из вариантов организации осей прямоугольной СК.

Координаты в пространстве в прямоугольной СК задаются тройным кортежем вещественных чисел (x, y, z) относительно начала координат $(0,0,0)$. Начало координат выбирается с учетом сценария использования локальной и глобальной систем координат. Тройной кортеж (x, y, z) может задавать точку в пространстве или вектор в трехмерном Евклидовом пространстве. В векторном пространстве оси координат являются базисными векторами, а вектор задает направление на точку

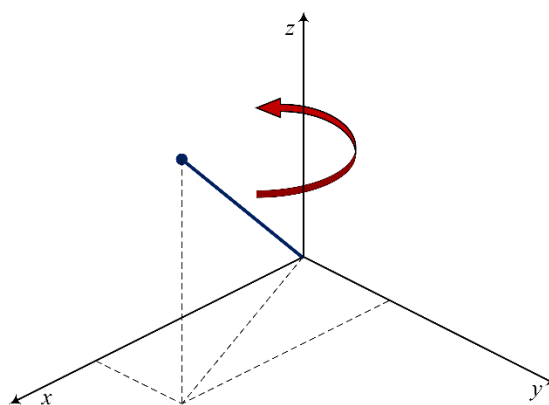


Рис. 1. Прямоугольная система координат

в пространстве от начала координат. Каждый вектор в пространстве однозначно определяется линейной комбинацией базисных векторов. Наиболее распространенным набором базисных векторов для трехмерного Евклидова пространства являются стандартные единичные базисные векторы:

$$\{[1 \ 0 \ 0], [0 \ 1 \ 0], [0 \ 0 \ 1]\}. \quad (1)$$

В пакете расширения PAST оси координат и точки в пространстве (x, y, z) задаются векторами-столбцами $[x, y, z]^T$. Для удобства далее знак транспонирования будем опускать. Обозначение вектора $\mathbf{x} = [x, y, z]$ и точки (x, y, z) взаимозаменяемы; интерпретация вектора-столбца как точки или вектора определяется контекстом: если вектор столбец задает оси системы координат или направление, тогда это вектор; если вектор столбец задает координаты, тогда это точка.

Ортогональный базис и Евклидова норма. Любые три линейно независимых вектора определяют базис трехмерного пространства. Однако в пакете расширения Phased Array System Toolbox предполагается, что используемые базисные векторы ортогональны. Стандартной мерой расстояния в пространстве является норма l_2 , или Евклидова норма. Евклидова норма $\|\mathbf{x}\|_2$ вектора $\mathbf{x} = [x, y, z]$ дает длину вектора, измеренную от начала координат, и определяется как:

$$\|\mathbf{x}\|_2 = \sqrt{\sum_i |x_i|^2} = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}. \quad (2)$$



Также Евклидова норма определяет геометрическое расстояние между двумя точками/векторами $[x_0, y_0, z_0]$ и $[x_l, y_l, z_l]$ в пространстве:

$$\|\Delta \mathbf{x}_{0l}\|_2 = \sqrt{(x_0 - x_l)^2 + (y_0 - y_l)^2 + (z_0 - z_l)^2}. \quad (3)$$

Ориентация осей координат. Учитывая ортонормированный набор базисных векторов, представляющих оси координат, существует несколько способов ориентации осей. Рис. 1 показывает одну из таких ориентаций, называемую *правосторонней* системой координат. Стрелки на осях СК указывают положительные направления. Если взять правую руку и направить ее вдоль положительной оси x ладонью, обращенной к положительной оси y , и вытянуть большой палец, то он укажет положительное направление оси z .

Повороты и матрицы поворота. При преобразовании векторов в трехмерном пространстве часто используются матрицы поворота. Матрицей поворота называется ортогональная матрица, которая используется для выполнения собственного ортогонального преобразования в Евклидовом пространстве. При умножении любого вектора на матрицу поворота длина вектора сохраняется. Определитель матрицы поворота равен единице. Матрицы поворота могут использоваться в двух сценариях: для поворота вектора в новое положение и для поворота системы координат (базиса) в новую СК. В последнем сценарии вектор остается в исходном положении, но его компоненты в новой СК (базисе) будут отличаться от компонентов исходной СК (базиса). В Евклидовом пространстве есть три основных поворота: по одному вокруг осей x , y и z ; поворот определяется углом поворота α , β и γ соответственно. Рис. 2 иллюстрирует три поворота вектора вокруг осей СК.

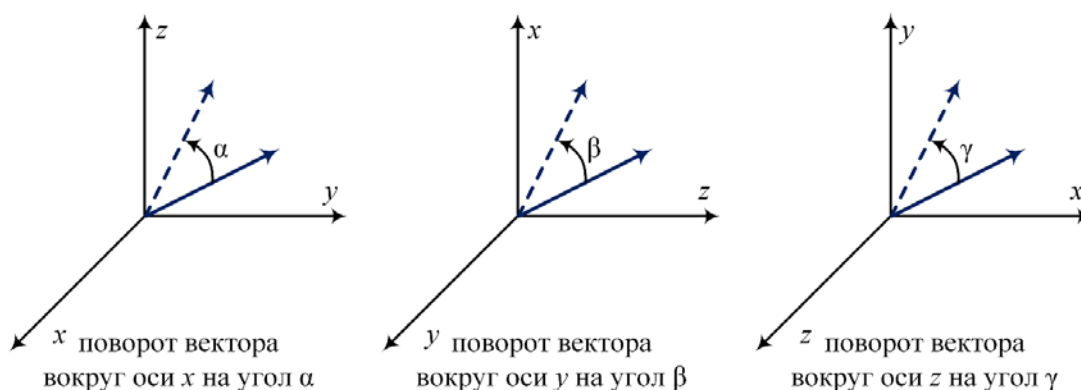


Рис. 2. Поворот вектора вокруг осей системы координат

Угол поворота определяется как положительный при повороте против часовой стрелки, если смотреть на него вдоль оси вращения в направлении начала СК. Любой произвольный поворот A может быть составлен из комбинации трех поворотов (теорема Эйлера о повороте), т. е. можно повернуть вектор \mathbf{v} в любом направлении, используя последовательность из трех поворотов:

$$\mathbf{v}' = A\mathbf{v} = R_z(\gamma)R_y(\beta)R_x(\alpha)\mathbf{v}; \quad (4)$$



$$\mathbf{A} = \mathbf{R}_z(\gamma)\mathbf{R}_y(\beta)\mathbf{R}_x(\alpha); \quad (5)$$

где матрицы поворота $\mathbf{R}_x(\alpha)$, $\mathbf{R}_y(\beta)$, $\mathbf{R}_z(\gamma)$ вокруг осей x , y и z определяются следующими выражениями. Поворот против часовой стрелки вокруг оси x на угол α определяется матрицей:

$$\mathbf{R}_x(\alpha) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & -\sin \alpha \\ 0 & \sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix}. \quad (6)$$

Поворот против часовой стрелки вокруг оси y на угол β определяется матрицей:

$$\mathbf{R}_y(\beta) = \begin{bmatrix} \cos \beta & 0 & \sin \beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \beta & 0 & \cos \beta \end{bmatrix}. \quad (7)$$

Поворот против часовой стрелки вокруг оси z на угол γ определяется матрицей:

$$\mathbf{R}_z(\gamma) = \begin{bmatrix} \cos \gamma & -\sin \gamma & 0 \\ \sin \gamma & \cos \gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (8)$$

Для любого поворота \mathbf{A} существует обратный поворот \mathbf{A}^{-1} , удовлетворяющий условию:

$$\mathbf{A}^{-1}\mathbf{A} = \mathbf{1}. \quad (9)$$

Например, матрица обратного поворота по оси x получается путем изменения знака угла поворота α :

$$\mathbf{R}_x^{-1}(\alpha) = \mathbf{R}_x(-\alpha) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & \sin \alpha \\ 0 & -\sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix}. \quad (10)$$

Из (10) следует, что матрица обратного поворота $\mathbf{R}_x^{-1}(\alpha)$ является транспонированием исходной матрицы поворота $\mathbf{R}_x(\alpha)$ и удовлетворяет условиям:

$$\mathbf{A}^T\mathbf{A} = \mathbf{1}; \det(\mathbf{A}) = 1. \quad (11)$$

При повороте длина вектора и углы между векторами сохраняются. При умножении на матрицу поворота вектора-столбца координаты вектора преобразуются в соответствии с поворотом самого вектора, т.е. при этом координаты повернутого вектора получаются в той же, неподвижной системе координат.

Рассмотрим теперь поворот в другом сценарии. Допустим, есть исходный набор базисных векторов $\mathbf{i}, \mathbf{j}, \mathbf{k}$. Рассмотрим их поворот матрицей \mathbf{A} . В результате будет новый набор базисных векторов $\mathbf{i}', \mathbf{j}', \mathbf{k}'$, которые связаны векторами с исходными следующими выражениями:



$$\begin{aligned} \mathbf{i}' &= \mathbf{A}\mathbf{i}; \\ \mathbf{j}' &= \mathbf{A}\mathbf{j}; \\ \mathbf{k}' &= \mathbf{A}\mathbf{k}. \end{aligned} \quad (12)$$

Используя операцию транспонирования матрицы поворота \mathbf{A}^T , новый набор базисных векторов $\mathbf{i}', \mathbf{j}', \mathbf{k}'$ можно представить в виде линейной комбинации исходного набора базисных векторов $\mathbf{i}, \mathbf{j}, \mathbf{k}$:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{i}' \\ \mathbf{j}' \\ \mathbf{k}' \end{bmatrix} = \mathbf{A}^T \begin{bmatrix} \mathbf{i} \\ \mathbf{j} \\ \mathbf{k} \end{bmatrix}. \quad (13)$$

Теперь любой вектор можно записать как линейную комбинацию набора базисных векторов:

$$\mathbf{v} = v_x \mathbf{i} + v_y \mathbf{j} + v_z \mathbf{k} = v'_x \mathbf{i}' + v'_y \mathbf{j}' + v'_z \mathbf{k}'. \quad (14)$$

Далее можно получить преобразование компонентов для фиксированного вектора, когда поворачивается система координат (базис). Это преобразование использует транспонирование матрицы поворота:

$$\begin{bmatrix} v'_x \\ v'_y \\ v'_z \end{bmatrix} = \mathbf{A}^{-1} \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \end{bmatrix} = \mathbf{A}^T \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \end{bmatrix}. \quad (15)$$

Рис. 3 иллюстрирует преобразование вектора при повороте СК вокруг оси x на угол α , а также интерпретацию этого преобразования через поворот вектора в противоположном направлении. Таким образом, матрица поворота СК отличается от матрицы поворота вектора знаком угла поворота, и одна может быть получена из другой заменой угла поворота на противоположный; та и другая взаимно обратны и могут быть получены друг из друга транспонированием.

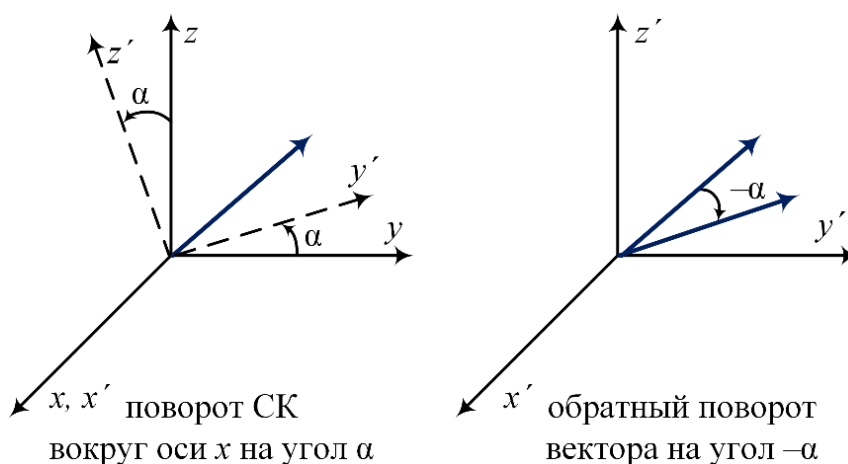


Рис. 3. Поворот осей системы координат вокруг оси x



2.2 Прямоугольная система координат

Сферические координаты описывают вектор или точку в пространстве с расстоянием и двумя углами. Расстояние R от точки до начала координат (радиальное расстояние) является обычной Евклидовой нормой. Относительно углов в пакете расширения PAST существует несколько соглашений. Рассмотрим сферическую СК с азимутом φ и углом места θ . Координаты точки или вектора задаются кортежем (φ, θ, R) . Азимутальный угол φ вектора – это угол между осью x и ортогональной проекцией вектора на плоскость xy . Азимутальный угол φ положителен при движении от оси x к оси y . Азимутальные углы лежат в пределах от -180° до 180° градусов. Угол места θ – это угол между вектором и его ортогональной проекцией на плоскость xy . Угол места θ положительный при движении к положительной оси z от плоскости xy . По умолчанию направлению визирования (*boresight direction*) элемента или массива AP выровнено с положительной осью x . Направление визирования – это направление главного лепестка элемента или массива. Рис. 4 иллюстрирует обозначения, принятые для сферической СК.

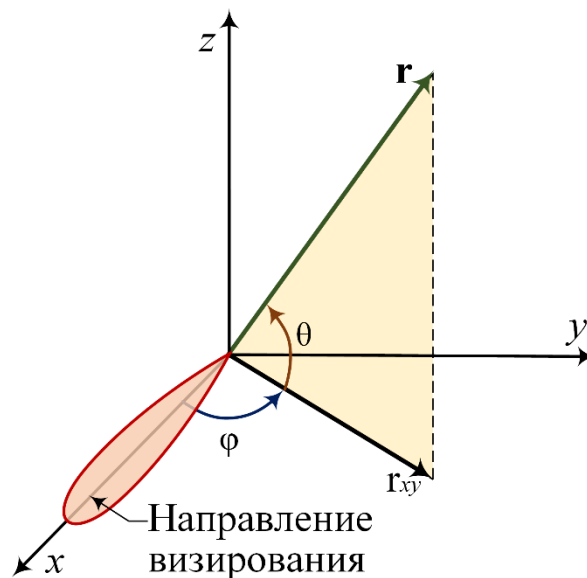


Рис. 4. Сферическая система координат

Преобразование между прямоугольной и сферической СК. Рассмотрим соотношения, определяющие преобразования между прямоугольными координатами (x, y, z) и сферическими координатами (φ, θ, R) , используемые в пакете расширения PAST. Для преобразования прямоугольных координат (x, y, z) в сферические (φ, θ, R) используются соотношения:

$$R = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}; \quad (16)$$

$$\varphi = \tan^{-1}(y/x); \quad (17)$$

$$\theta = \tan^{-1}(z/\sqrt{x^2 + y^2}); \quad (18)$$



Для преобразования сферических координат (φ, θ, R) в прямоугольные (x, y, z) используются следующие соотношения:

$$x = R \cos(\theta) \cos(\varphi); \quad (19)$$

$$y = R \cos(\theta) \sin(\varphi); \quad (20)$$

$$z = R \sin(\theta). \quad (21)$$

При указании МП объекта относительно фазированной антенной решетки (ФАР) обычно используют его расстояние и направление от АР. Расстояние объекта относительно АР равно R в сферических координатах. Направление объекта относительно АР соответствует углам азимута φ и места θ .

Для преобразования из прямоугольных (x, y, z) в сферические (φ, θ, R) координаты и обратно в пакете расширения PAST используются функции `cart2sph` и `sph2cart` соответственно. Эти функции задают углы в радианах. Чтобы преобразовать градусы в радианы и обратно, используются функции `deg2rad` и `rad2deg`.

Углы раскрыва (Broadside Angles). Углы раскрыва/обзора полезны при описании отклика/реакции эквидистантной линейной антенной решетки ULA (*Uniform Linear Array*) на входной сигнал. Отклик АР зависит непосредственно от угла раскрыва, а не от углов азимута и места. Рис. 5 иллюстрирует линейную антенную решетку ULA (*Uniform Linear Array*) в пространстве, элементы которой расположены на оси y , и перпендикулярную ей плоскость. Угол раскрыва β – это угол между данной плоскостью

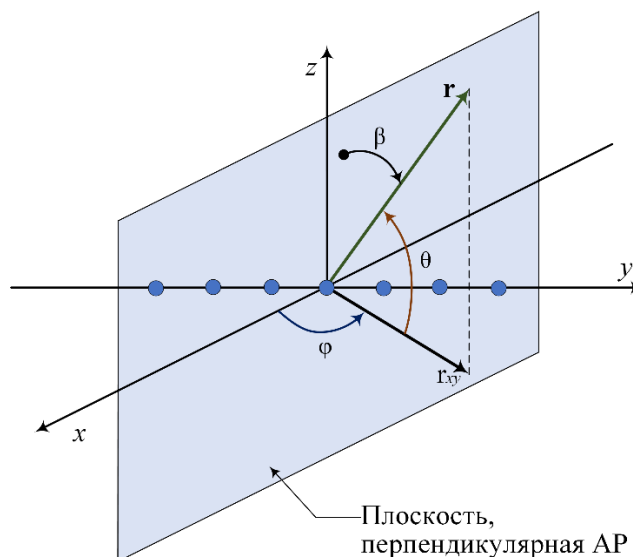


Рис. 5. Угол раскрыва линейной АР в пространстве

и направлением прихода DOA/AOA (*Direction/Angle of Arrival*) или ухода DOD/AOD (*Direction/Angle of Departure*) сигнала, характеризуемого вектором \mathbf{r} .

Чтобы вычислить угол раскрыва, следует провести линию из любой точки направления прихода/ухода сигнала к плоскости, перпендикулярной плоскости АР. Полученный между двумя линиями угол раскрыва β лежит в интервале $[-90^\circ, 90^\circ]$. Угол раскрыва положителен при измерении в положительном направлении оси АР. Угол раскрыва, равный 0° , указывает направление прихода/ухода сигнала, ортогональное оси антенной решетки. Угол раскрыва, равный $\pm 90^\circ$, указывает направление прихода/ухода сигнала вдоль оси антенной решетки. Одинаковые направления прихода/ухода сигнала образуют конус вокруг оси линейной АР. Для преобразования угла азимута φ и угла места θ в угол раскрыва β используется выражение:



$$\beta = \sin^{-1}(\sin \varphi \cos \theta). \quad (22)$$

Из выражения (22) можно сделать следующие выводы:

- а) для угла места, равного нулю $\theta = 0^\circ$, угол раскрыва β равен углу азимута φ ;
- б) углы места θ над и под плоскостью xy приводят к одинаковым углам раскрыва β .

Для преобразования угла раскрыва β и угла места θ в угол азимута φ используется выражение:

$$\varphi = \sin^{-1} \left(\frac{\sin \beta}{\cos \theta} \right); \quad (23)$$

Так как направления прихода/ухода сигнала для заданного угла раскрыва β образуют конус вокруг оси линейной АР, угол места θ и угол раскрыва β должны удовлетворять условию:

$$|\theta| + |\beta| < 90^\circ. \quad (24)$$

Рис. 6 иллюстрирует угол раскрыва линейной АР в плоскости xy . Расстояние между элементами линейной АР, расположенными вдоль оси y , равно d . Допустим линейная АР облучается плоской волной, излучаемой точечным источником в дальней зоне. Для удобства, угол места принят равным $\theta = 0^\circ$; тогда угол направления прихода лежит в плоскости xy , а угол раскрыва β равен углу азимута φ .

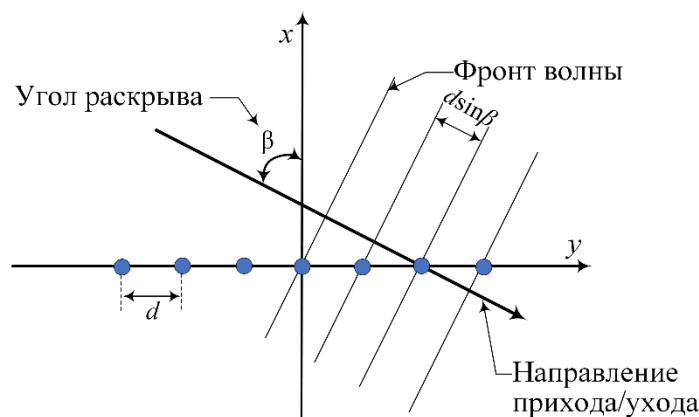


Рис. 6. Угол раскрыва линейной АР в плоскости xy

Вследствие ненулевого угла прихода DOA/AOA фронт плоской волны достигает каждого элемента линейной антенной решетки неодновременно. Дополнительное расстояние, которое проходит падающая под углом β волна между элементами антенной решетки, равно $d \sin \beta$, где d – расстояние между элементами решетки. Постоянная временная задержка τ между элементами АР равна:

$$\tau = \frac{d \sin \beta}{c}; \quad (25)$$



где c – скорость света. Для углов раскрыва β , равных $\pm 90^\circ$, сигнал плоской волны приходит на линейную антенную решетку параллельно оси AP, и задержка времени прихода на каждый элемент составляет $\pm d/c$. Для угла раскрыва β , равного 0° , сигнал плоской волны приходит на каждый элемент AP одновременно, и задержка времени прихода TOA (*Time of Arrival*) равна нулю.

В пакете расширения PAST для преобразования угла азимута φ в угол раскрыва β и наоборот используются функции `az2broadside` и `broadside2az` соответственно. Допустим, объект находится под углом азимута $\varphi = 45^\circ$ и углом места $\theta = 60^\circ$ относительно линейной антенной решетки ULA. Тогда соответствующий угол раскрыва β определяется командой `bsang=az2broadside(45,60)=20.7048`. Допустим, направление прихода сигнала от объекта определяется углом раскрыва $\beta = 45^\circ$ и углом места $\theta = 20^\circ$ относительно линейной антенной решетки ULA. Тогда соответствующий угол азимута определяется командой `az=broadside2az(45,20)=48.8063`.

3 Глобальная и локальная СК в Phased Array System Toolbox

Глобальная система координат. Глобальная система координат описывает область, в которой происходит имитационное моделирование. В этой области можно территориально разместить, например, объект-цель определения местоположения (ОМП) и объект радиолокационной станции (РЛС) или радар. Эти объекты-платформы могут быть как стационарными, так и подвижными. Местоположение и движение платформ задается в глобальной системе координат. Для моделирования движения платформ в глобальной СК используется системный объект (СО) `Phased.Platform`. Данный СО вычисляет местоположение и скорость платформ, используя модели постоянной скорости или постоянного ускорения. В заданном сценарии территориального расположения платформ можно моделировать условия распространения радиоволн (РРВ) между ними. Пути лучей при РРВ между передатчиком, объектом-целью и приемником, задаются в глобальных координатах. Для моделирования условий РРВ в пакете расширения PAST есть системные объекты для: ИМ РРВ в свободном пространстве `Phased.FreeSpace`, ИМ РРВ в свободном пространстве широкополосных сигналов `Phased.WidebandFreeSpace`, ИМ РРВ в условиях прямой видимости LOS (*Line of Sights*) `Phased.LOSChannel`, ИМ РРВ в условиях прямой видимости LOS широкополосных сигналов `Phased.WidebandLOSChannel`. Для моделирования двухлучевого радиоканала используется системный объект `twoRayChannel` из пакета Radar Toolbox⁵ с граничной плоскостью с $z = 0$ в глобальной СК.

Локальная система координат. Взаимодействие радиосигналов с элементами-сенсорами объекта AP или объектом-целью функционально определяется в локальной системе координат объекта/платформы AP или объекта/платформы цели. За платформой AP и платформой цели закреплены локальные системы координат; при этом локальная СК движется и вращается вместе с платформой; также локальная СК адаптируется к форме и симметрии объекта-платформы.

⁵ Radar Toolbox. MathWorks. URL: <https://www.mathworks.com/products/radar.html> (дата обращения: 29.09.2022)



Поскольку радиосигналы распространяются в глобальной системе координат, необходимо иметь возможность преобразовывать локальные координаты в глобальные координаты. Это делают путем формирования матрицы координатных осей размером 3 на 3. Столбцы матрицы представляют три ортогональных вектора направления локальных координат, выраженных в глобальной системе координат. Оси координат локальной системы координат должны быть ортонормированы, но они не должны быть параллельны глобальным осям координат. Для вычисления дальности и углов прихода сигнала можно использовать функцию `rangeangle`. При вызове этой функции с аргументами местоположения передатчика и приемника, выраженными в глобальных координатах, функция возвращает дальность и углы прихода – азимут и угол места – по отношению к осям глобальной системы координат. При сообщении функции `rangeangle` дополнительного аргумента – матрицы ориентации – азимут и угол места определяются по отношению к осям локальной системы координат.

Локальная система координат используется для:

а) определения расположения и ориентации элементов антенной решетки; диаграмма направленности АР зависит от направления прихода или излучения сигнала по отношению к локальным координатам антенной решетки;

б) моделирования процесса отражения сигнала от объекта-цели в зависимости от угла падения и угла отражения по отношению к локальным координатам объекта-цели.

Рассмотрим пример использования локальной СК: летательный аппарат (ЛА) имеет локальную СК с осью x , выровненной вдоль оси фюзеляжа корпуса ЛА, и осью y , направленной вдоль левого крыла; ось z выбирается таким образом, чтобы сформировать правую систему координат. Рис. 7 иллюстрирует сценарий локальной и глобальной СК для бистатического радара и ЛА как объекта цели.

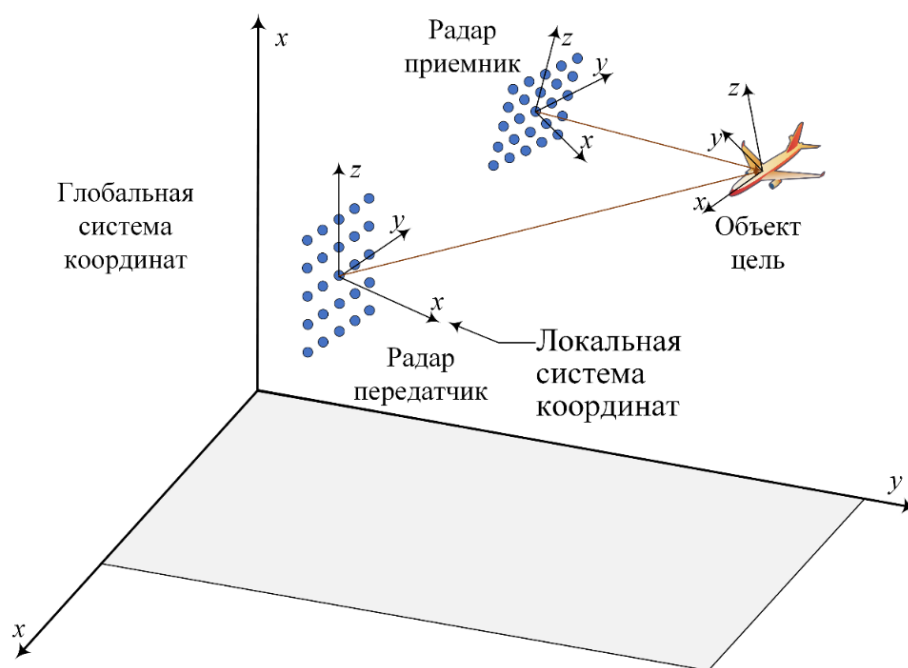


Рис. 7. Локальная и глобальная СК для бистатического радара



Бистатический радар включает радар передатчик и радар приемник с прямоугольной AP URA (*Uniform Rectangular Array*) размерностью 5 на 5 элементов. Каждая AP имеет свою локальную СК. Объект-цель также имеет свою локальную СК. Рассмотрим далее особенности использования локальных систем координат для антенных решеток.

4 Локальные системы координат антенных решеток

Локальные системы координат массива AP. Положения элементов массива любой AP в PAST всегда определяются в локальной системе координат. При использовании системных объектов, которые создают эквидистантные массивы AP, положения элементов массива определяются автоматически относительно определенной локальной СК. Массивы, для которых выполняется это свойство, включают системные объекты следующих эквидистантных фазированных AP: линейной AP Phased.ULA, прямоугольной Phased.URA, круговой AP Phased.UCA, линейной гетерогенной Phased.HeterogeneousULA и прямоугольной гетерогенной Phased.HeterogeneousURA. Для этих системных объектов массивы AP описываются с помощью нескольких параметров, таких как расстояние между элементами d и количество элементов. Положения элементов AP определяются относительно начала координат массива, расположенного в точке $(0,0,0)$, которая является геометрическим центром массива AP. Геометрический центр массива элементов является достаточно хорошим приближением к фазовому центру антенной решетки. Фазовый центр массива определяет точку, из которой излучаются радиоволны при наблюдении в дальней зоне. Например, для линейной AP ULA с нечетным числом элементов элементы расположены на расстояниях $(-2d, -d, 0, d, 2d)$ по оси массива. Также существуют системные объекты Phased Array System Toolbox для которых необходимо явно указать координаты элементов. Эти объекты можно использовать для создания произвольных фигур массива элементов: Phased.ConformalArray, Phased.HeterogeneousConformalArray; для этих массивов фазовый центр не обязательно должен совпадать с началом массива или его геометрическим центром.

Направления раскрывая элементов AP (Element Boresight Directions). В дополнение к положениям элементов AP необходимо указывать ориентацию элементов, то есть направления, в которых излучают элементы. Некоторые элементы имеют высокую направленность – большая часть излучаемой ими энергии электромагнитного поля (ЭМП) ориентирована в одном направлении, называемом направлением главного излучения или главной осью отклика MRA (*Main Response Axis*) приемного сенсора. Другие элементы являются всенаправленными. Ориентация элемента – это его направление главного излучения, или направление MRA. Ориентация элемента задается посредством угла азимута и угла места в локальной СК массива элементов AP. Направление, в котором ориентирована антенна или сенсор MRA при передаче/приеме сигнала, также называется направлением раскрыва (*boresight direction*). Для эквидистантных антенных решеток все направления раскрыва/визирования всех элементов определяются параметрами массива AP. У конформных массивов направление раскрыва/визирования задается для каждого элемента независимо.



4.1 Локальная СК эквидистантной линейной решетки

Начало массива и центр фаз ULA. Эквидистантная линейная антенная решетка ULA представляет собой решетку антенных или микрофонных элементов, расположенных на одинаковом расстоянии друг от друга вдоль прямой линии. В пакете PAST объект `Phased.ULA` служит для формирования массива антенной решетки ULA. Геометрия ориентации элементов ULA определяется тремя параметрами: числом элементов, расстоянием между элементами и свойством `ArrayAxis`. Для ULA локальная система координат адаптируется к массиву, т. е. элементам автоматически присваиваются позиции в локальной СК. Позиции элементов в массиве определяются свойством `ArrayAxis`, которое может принимать значения 'x', 'y' или 'z'. Свойство оси массива определяет ось, на которой определены все элементы. Например, если для свойства `ArrayAxis` задано значение 'x', элементы массива располагаются вдоль оси x . Элементы располагаются симметрично относительно начала координат. Следовательно, геометрический центр массива лежит в начале СК.

Рис. 8 иллюстрирует четырехэлементную эквидистантную линейную антенную решетку в локальной правосторонней системе координат. Элементы лежат на оси y с углом раскрытия/визирования в положительном направлении оси x ; в этом случае для свойства `ArrayAxis` установлено значение 'y'.

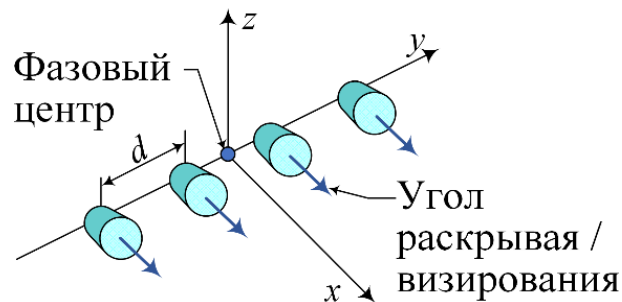


Рис. 8. Ориентация элементов линейной антенной решетки

Направление визирования элемента линейной AP (ULA Element Boresight Direction). В линейной AP ULA углы визирования каждого элемента ориентированы в одном и том же направлении. Это направление ортогонально оси массива ULA и зависит от выбора свойства `ArrayAxis`. Таблица 1 содержит соотношение между свойством `ArrayAxis` и направлением визирования.

Таблица 1.

Ось массива и направление визирования линейной AP

Свойство <code>ArrayAxis</code>	Позиции элементов и направление визирования
'x'	элементы лежат на оси x , вектор угла визирования направлен вдоль оси y
'y'	элементы лежат на оси y , вектор угла визирования направлен вдоль оси x
'z'	элементы лежат на оси z , вектор угла визирования направлен вдоль оси x



Локальные координаты, адаптированные к ULA. Рассмотрим примеры линейных эквидистантных антенных решеток и позиции элементов ULA в локальной системе координат.

Скрипт 1 иллюстрирует пример формирования четырехэлементной AP с расстоянием между элементами $d = 0,5$ м (рис. 9).

Скрипт 1. Пример формирования четырехэлементной AP

```
sULA = phased.ULA('NumElements',4,'ElementSpacing',0.5);
ElementLocs = getElementPosition(sULA)
ElementLocs = 3x4
    0         0         0         0
   -0.7500   -0.2500    0.2500    0.7500
    0         0         0         0
viewArray(sULA)
```

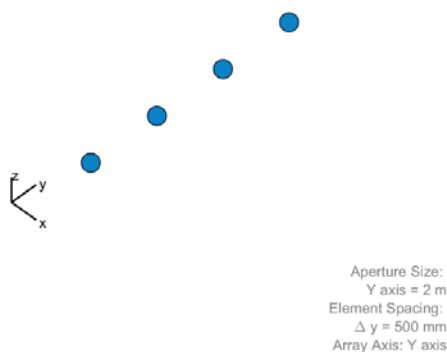


Рис. 9. Четырехэлементная линейная AP

За начало локальной СК для линейной AP принят фазовый центр массива ULA. Фазовый центр представляет собой среднее по каждой оси значение позиций элементов массива по каждой оси:

```
>> disp(mean(ElementLocs'))
    0     0     0
```

Так как линейная AP, рассмотренная выше, имеет четное число элементов, ни один из них не лежит в фазовом центре с локальными координатами (0,0,0).

Скрипт 2 иллюстрирует пример формирования пятиэлементной AP с расстоянием между элементами $d = 0,3$ м (рис. 10).

Скрипт 2. Пример формирования пятиэлементной AP

```
sULA1 = phased.ULA('NumElements',5,'ElementSpacing',0.3);
ElementLocs = getElementPosition(sULA1)
ElementLocs = 3x5
    0         0         0         0         0
   -0.6000   -0.3000    0     0.3000    0.6000
    0         0         0         0         0
viewArray(sULA1)
```

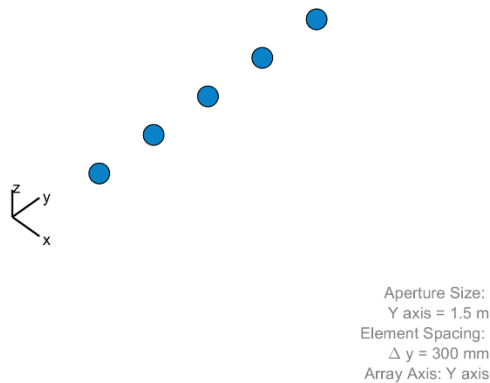


Рис. 10. Пятиэлементная линейная AP

Так как рассмотренная линейная AP имеет нечетное число элементов, центральный элемент лежит в фазовом центре с локальными координатами (0,0,0).

4.2 Локальная СК эквидистантной прямоугольной решетки

Начало массива и центр фаз URA. Равномерная прямоугольная решетка URA представляет собой решетку антенных или микрофонных элементов, размещенных на регулярной двумерной сетке. Геометрия URA, расположение и ориентация ее элементов определяются несколькими параметрами: размерами массива, расстоянием между элементами и свойством `ArrayNormal`. Для URA локальная СК адаптирована к массиву, а именно, элементам URA автоматически присваиваются позиции в локальной СК. Началом локальной системы координат является геометрический центр массива URA. Фазовый центр решетки URA совпадает с геометрическим центром. Элементам автоматически назначаются позиции в этой локальной системе координат. Позиции определяются свойством `ArrayNormal`, которое может принимать значения 'x', 'y' или 'z'. Все элементы URA лежат в плоскости, проходящей через начало координат и являющейся ортогональной оси, указанной в этом свойстве. Например, когда для свойства `ArrayNormal` установлено значение 'x', элементы массива URA лежат в плоскости yz, как показывает рис. 11: на рисунке показан массив URA размером 2 на 4 элемента, которые отстоят друг от друга на d метров в обоих направлениях y и z.

Направление визирования элемента прямоугольной AP (URA Element Boresight Direction). В URA, как и в ULA, направления визирования каждого элемента AP указывают в одном и том же направлении. Конфигурация направления осуществляется посредством свойства `ArrayNormal`. Для прямоугольной решетки URA, которую иллюстрирует рис. 11, свойства `ArrayNormal` установлено в значение 'x', поэтому направления/углы визирования каждого элемента ориентированы вдоль оси x. Таблица 2 содержит соотношение между свойством `ArrayAxis` и направлением визирования прямоугольной AP.

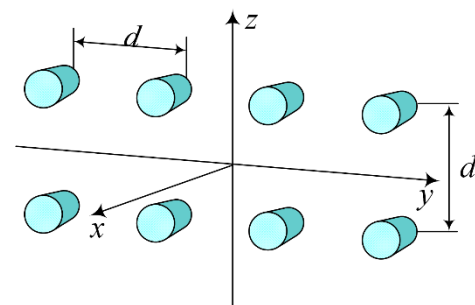


Рис. 11. Ориентация элементов прямоугольной антенной решетки



Таблица 2.

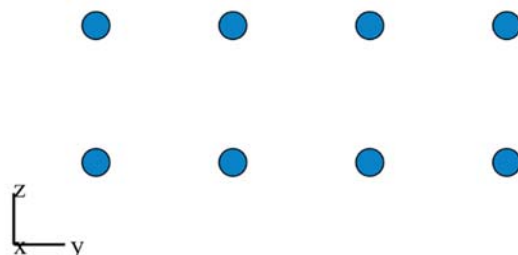
Ось массива и направление визирования прямоугольной AP

Свойство ArrayAxis	Позиции элементов и направление визирования
'x'	элементы лежат на плоскости yz , вектор угла визирования направлен вдоль оси x
'y'	элементы лежат на плоскости zx , вектор угла визирования направлен вдоль оси y
'z'	элементы лежат на плоскости xy , вектор угла визирования направлен вдоль оси z

Локальные координаты, адаптированные к URA. Рассмотрим два примера прямоугольных AP и покажем координаты элементов URA относительно локальной системы координат. Скрипт 3 иллюстрирует пример формирования прямоугольной AP 2×4 с расстоянием между элементами $d = 0,5$ м (рис. 12).

Скрипт 3. Пример формирования прямоугольной AP 2×4

```
sURA = phased.URA('Size',[2 4],'ElementSpacing',[0.5 0.5]);
ElementLocs = getElementPosition(sURA)
ElementLocs =
    0          0          0          0          0          0          0          0
 -0.7500 -0.7500 -0.2500 -0.2500  0.2500  0.2500  0.7500  0.7500
  0.2500 -0.2500  0.2500 -0.2500  0.2500 -0.2500  0.2500 -0.2500
viewArray(sURA)
```



Aperture Size:
 Y axis = 2 m
 Z axis = 1 m
 Element Spacing:
 $\Delta y = 500$ mm
 $\Delta z = 500$ mm

Рис. 12. Прямоугольная AP 2×4

Фазовый центр массива URA является средним значением местоположений элементов массива в локальной СК. Начало локальной системы координат массива устанавливается в фазовый центр массива:

```
>> disp(mean(ElementLocs'))
    0    0    0
```

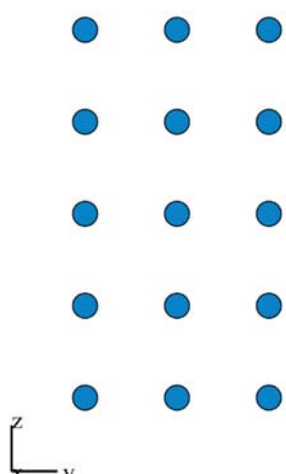


Поскольку рассмотренный выше массив URA имеет четное количество элементов в каждой строке и столбце, ни один элемент массива фактически не лежит в фазовом центре $(0, 0, 0)$.

Рассмотрим прямоугольную AP размером 5 на 3 с интервалом между элементами 30 сантиметров. Скрипт 4 иллюстрирует пример формирования прямоугольной AP 5×3 с расстоянием между элементами $d = 0,3$ м (рис. 13).

Скрипт 4. Пример формирования прямоугольной AP 5×3

```
>> sURA1 = phased.URA([5 3], 'ElementSpacing', [0.3 0.3]);
ElementLocs = getElementPosition(sURA1)
ElementLocs =
    Columns 1 through 8
         0         0         0         0         0         0         0         0
    -0.3000  -0.3000  -0.3000  -0.3000  -0.3000         0         0         0
     0.6000   0.3000         0  -0.3000  -0.6000   0.6000   0.3000         0
    Columns 9 through 15
         0         0         0         0         0         0         0
         0         0   0.3000   0.3000   0.3000   0.3000   0.3000
    -0.3000  -0.6000   0.6000   0.3000         0  -0.3000  -0.6000
viewArray(sURA1)
```



Aperture Size:
Y axis = 900 mm
Z axis = 1500 mm
Element Spacing:
 $\Delta y = 300$ mm
 $\Delta z = 300$ mm

Рис. 13. Прямоугольная AP 5×3

Так как рассмотренный массив URA имеет нечетное число элементов в каждой строке и столбце, центральный элемент массива находится в фазовом центре. Допустим, сигнал поступает на массив прямоугольной AP из точки на расстоянии 1000 метров от оси +x в глобальной СК, а в локальной СК массив URA поворачивается на 30° по часовой стрелке вокруг оси y, тогда угол прихода сигнала в локальных осях массива URA можно определить следующим образом:

```
>> laxes = roty(30);
[rng,ang] = rangeangle([1000,0,0]',[0,0,0]',laxes)
rng =
    1.0000e+03
```



ang =

$$\begin{matrix} 0 \\ 30.0000 \end{matrix}$$

4.3 Локальная СК эквидистантной круговой решетки

Начало массива и центр фазы UCA. Круговая эквидистантная антенная решетка UCA (*Uniform Circular Array*) представляет собой решетку антенных или микрофонных элементов, расположенных под равными углами по окружности. Системный объект `Phased.UCA` служит для формирования массива UCA. Для круговой AP направления визирования каждого элемента AP указывают в сторону от начала массива UCA, как спицы колеса. Началом локальной системы координат является геометрический центр массива круговой AP. Геометрия UCA, расположение и ориентация ее элементов определяется тремя параметрами: радиусом массива, количеством элементов и свойством `ArrayNormal`. Элементам автоматически назначаются местоположения в локальной системе координат. Позиции местоположений определяются свойством `ArrayNormal`, которое может принимать значения 'x', 'y' или 'z'. Все элементы лежат в плоскости, проходящей через начало координат и ортогональной оси, указанной в свойстве `ArrayNormal`. Фазовый центр решетки совпадает с геометрическим центром. Например, если `ArrayNormal` установлено в значение 'x', элементы массива лежат в плоскости *yz*, как показывает рис. 14. Для формирования более сложной круговой UCA с произвольными направлениями визирования отдельных элементов, используют системный объект `Phased.ConformalArray`.

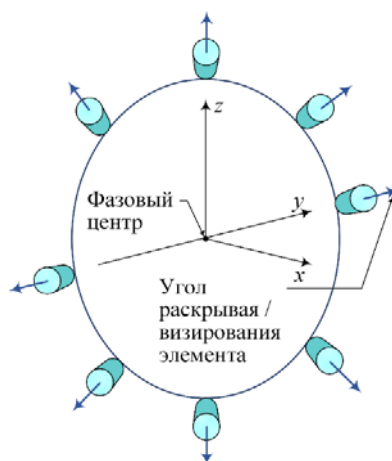


Рис. 14. Ориентация элементов круговой антенной решетки

Направления визирования элемента круговой AP. В круговой антенной решетке UCA, сформированной объектом `Phased.UCA`, направления оси визирования элементов указывают в радиальных направлениях от начала координат массива UCA. В эквидистантной круговой решетке, которую иллюстрирует рис. 14, для свойства `ArrayNormal` задано значение 'x', поэтому оси визирования каждого элемента направлены радиально наружу в плоскости *yz*. Таблица 3 содержит соотношение между свойством `ArrayAxis` и направлением визирования круговой AP.



Таблица 3.

Ось массива и направление визирования круговой АР

Свойство ArrayAxis	Позиции элементов и направление визирования
'x'	элементы лежат на плоскости yz , векторы углов визирования лежат в плоскости yz и направлены радиально наружу от начала СК круговой АР
'y'	элементы лежат на плоскости zx , векторы углов визирования лежат в плоскости zx и направлены радиально наружу от начала СК круговой АР
'z'	элементы лежат на плоскости xy , векторы углов визирования лежат в плоскости xy и направлены радиально наружу от начала СК круговой АР

5 Преобразование локальных и глобальных координат

При имитационном моделировании алгоритмов и методов цифрового диаграммообразования, функционирующих в составе систем massive MIMO сверхплотных сетей пятого 5G и последующих B5G (*Beyond 5G*) поколений диапазона миллиметровых волн (MMB, *millimeter-wave – mmWave*) [1, 2, 3] возникает необходимость воспроизведения условий распространения радиоволн (РРВ) в масштабах глобальной системы координат территориального расположения объектов передачи и приема и оценки их (РРВ) влияния на особенности пространственной обработки сигналов в масштабах локальных систем координат в антенных решетках. Поэтому актуальными и востребованными являются инструменты преобразования локальных и глобальных координат.

Рассмотрим определение положения объекта-цели в локальных сферических координатах с центром в фазовом центре массива URA. Допустим, центр прямоугольной решетки URA РЛС определяет начало локальной системы координат и имеет глобальные прямоугольные координаты $(5000, 3000, 50)$. Пусть локальные координатные оси URA РЛС задаются векторами $(0, 1, 0)$, $(1, 0, 0)$ и $(0, 0, -1)$. Пусть глобальные прямоугольные координаты объекта-цели определяются вектором $(1000, 500, 10)$. Выполним преобразование координат объекта-цели в локальные сферические координаты. Чтобы преобразовать глобальные прямоугольные координаты в локальные сферические координаты при вызове функции `global2localcoord` используется параметр 'rs':

```
>> lCoord = global2localcoord([5000; 3000; 50], 'rs', [1000; 500; 10], ...
    [0 1 0; 1 0 0; 0 0 -1])
lCoord =
    1.0e+03 *
    0.0580
    0.0006
    4.7173
```

Формат выходных данных имеет вид кортежа (φ, θ, R) , т. е. объект-цель расположена в местных сферических координатах по азимуту 58° , углу места $0,6^\circ$ и на удалении 4717 м.



Заключение

В настоящей работе представлен анализ систем координат, используемый в пакете расширения Phased Array System Toolbox специального программного обеспечения Matlab. Понимание данного программного инструментария лежит в основе разрабатываемого нового учебного курса «Технологии умных антенн 5G» и служит для имитационного моделирования вопросов формирования, передачи, приема и обработки сигналов с использованием моделей и методов диаграммообразования в сверхплотных сетях пятого 5G и последующих B5G поколений диапазона миллиметровых волн [1, 2, 3], в том числе, на основе технологий сетевого позиционирования [4, 5, 6].

Благодарность. Проект реализуется победителем грантового конкурса для преподавателей магистратуры 2021/2022 Стипендиальной программы Владимира Потанина.



Литература

1. Кучерявый А. Е. Сети связи ожидает блестящее наукоёмкое будущее // Электросвязь. 2022. № 1. С. 3–5.
2. Волков А. Н., Мутханна А. С. А., Кучерявый А. Е. Сети связи пятого поколения: на пути к сетям 2030 // Информационные технологии и телекоммуникации. 2020. Том 8. № 2. С. 32–43.
3. Кучерявый А. Е., Бородин А. С., Киричек Р. В. Сети связи 2030 // Электросвязь. 2018. № 11. С. 52–56.
4. Фокин Г. А. Технологии сетевого позиционирования. СПб.: СПбГУТ. 2020. 558 с.
5. Фокин Г.А. Комплекс моделей и методов позиционирования устройств в сетях пятого поколения : дис. ... д-ра техн. Наук : 05.12.13, 05.12.04 / Григорий Алексеевич Фокин. Санкт-Петербург, 2021. 499 с.
6. Фокин Г. А. Технологии сетевого позиционирования 5G. М.: Горячая Линия – Телеком. 2021. 456 с.

References

1. Kucheryavyy A.E. The communications network has a bright, science-intensive future // Elektrosvyaz. 2022. No. 1. pp. 3-5.
2. Volkov A.N., Mutkhanna A.S.A., Kucheryavyy A.E. Communication networks of the fifth generation: on the way to networks 2030 // Information technologies and telecommunications. 2020. Volume 8. No. 2. pp. 32–43.
3. Kucheryavyy A.E., Borodin A.S., Kirichek R.V. Communication networks 2030 // Elektrosvyaz. 2018. No. 11. pp. 52–56.
4. Fokin G. A. Network positioning technologies. SPb.: SPbGUT. 2020. 558 p.
5. Fokin G.A. A set of models and methods for positioning devices in fifth-generation networks. Dissertation for the degree of Doctor of Technical Sciences: 05.12.13. St. Petersburg. 2021. 499 p.
6. Fokin G. A. 5G network positioning technologies. M.: Hot Line - Telecom. 2021. 456 p.

Фокин Григорий Алексеевич

доктор технических наук, доцент, профессор
Санкт-Петербургского государственного университета
телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича
grihafokin@gmail.com

Fokin Grigory

Doctor of Engineering Sciences, Docent, Professor
at the Department, The Bonch-Bruевич Saint-Petersburg
State University of Telecommunications,
grihafokin@gmail.com