



УДК 621.396.933:527.8

А.С. Давыденко, С.Б. Макаров
Санкт-Петербург, Россия

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ЭТАЛОННОЙ РАЗНОСТИ ФАЗ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ОРИЕНТАЦИИ ОБЪЕКТА

A.S. Davydenko, S.B. Makarov
St.-Petersburg, Russia

APPLICATION OF A METHOD OF A REFERENCE PHASES DIFFERENCE FOR DEFINITION OF SPATIAL OBJECT ORIENTATION

Показана возможность использования метода эталонной разности фаз для определения пространственного положения объекта при повороте платформы на угол $0-360^\circ$ в условиях компенсации неоднозначности в определении углов поворота. Предложено несколько методов повышения точности определения пространственного положения объекта.

ПРОСТРАНСТВЕННОЕ ПОЛОЖЕНИЕ ОБЪЕКТА. ВЕКТОР-БАЗА. КОМПЕНСАЦИЯ НЕОДНОЗНАЧНОСТЕЙ. ЭТАЛОННАЯ РАЗНОСТЬ ФАЗ.

Possibility of use of a method of a reference phases difference for definition of spatial positioning of object at platform turn on a corner $0-360^\circ$ in the conditions of ambiguity compensation in definition of angles of rotation is shown. Some methods of increase of accuracy of definition of spatial provision of object are offered.

SPATIAL OBJECT POSITION. BASE VECTOR. AMBIGUITY COMPENSATION. REFERENCE PHASES DIFFERENCE.

Метод эталонной (эквивалентной) разности фаз используется в корреляционных интерферометрах для определения пеленга на источник излучений [1]. Алгоритм работы интерферометра заключается в последовательном сравнении значений теоретической (эталонной) разности фаз, полученных для различных углов прихода волны, со значениями разности фаз, полученными в результате экспериментальных измерений. Пары антенных элементов A_i и A_j ($i, j = 1, 2, \dots, i \neq j$) подключены к приемным устройствам, на выходах которых и происходит измерение экспериментальной разности фаз принимаемого колебания между двумя антенными элементами (вектора-базы A_{ij}), расположенными на расстоянии d друг от друга. Сравнение производится в соответствии с критерием минимального среднеквадратичного отклонения или коэффициента корреляции. Максимальный коэффициент корреляции соответствует максимально достоверному направлению на источник излучения.

Ниже будет рассмотрено применение метода эталонной разности фаз для определения про-

странственного положения объекта и предложены пути, позволяющие повысить точность определения координат объекта.

Основные определения. При определении пространственной ориентации объекта, в отличие от задачи нахождения неизвестного пеленга на источник излучения, требуется найти пространственные углы наклона объекта (платформы) относительно выбранной системы координат при известных координатах источника излучения [2]. Платформа представляет собой плоскость, на которой расположены один или несколько векторов-баз произвольной длины (рис. 1 а). В общем случае вектора-базы могут быть расположены в разных плоскостях (рис. 1 б).

С платформой связана декартова правая система координат, центр которой совмещен, как правило, с одним из антенных элементов, который называется *опорным*. Платформа совершает повороты вокруг оси Z_0 (угол курса α), вокруг оси X_0 (угол тангажа β), вокруг оси Y_0 (угол крена γ). Под углами поворота платформы понимают углы Эйлера (α, β, γ) , на которые повернута

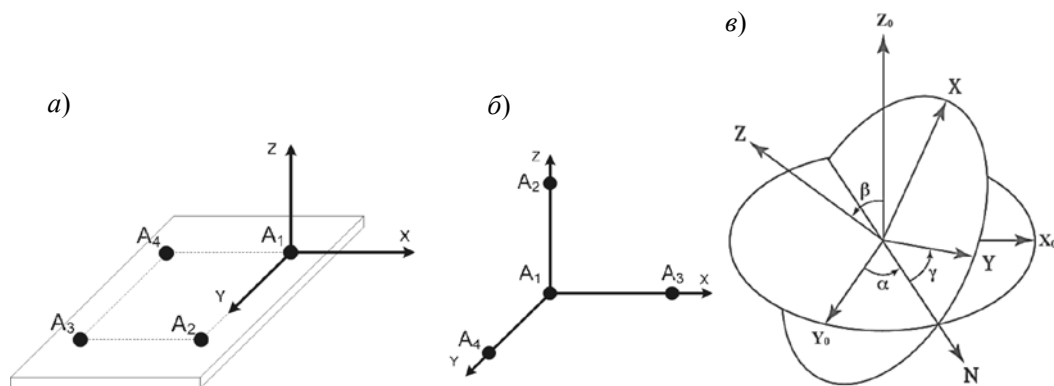


Рис. 1. Платформа с тремя векторами-базами:
а – в одной плоскости; б – в разных плоскостях; в – углы поворота Эйлера

система координат платформы относительно неподвижной системы координат (рис. 1 в).

При измерении координат антенных элементов подразумевается, что в начальный момент времени платформа ориентирована с нулевыми углами α , β , γ , и оси системы координат платформы сонаправлены с соответствующими осями геоцентрической системы координат и обозначаются X_0, Y_0, Z_0 [3]. Вектор-база A_{ij} имеет проекции на оси неподвижной системы координат X_0, Y_0, Z_0 соответственно $A_{ij} = \{x_{ij}, y_{ij}, z_{ij}\}$.

Вращение системы координат вокруг осей выполняется при помощи матриц поворота:

$$A(\alpha) = \begin{pmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha & 0 \\ \sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$A(\beta) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \beta & -\sin \beta \\ 0 & \sin \beta & \cos \beta \end{pmatrix}$$

$$A(\gamma) = \begin{pmatrix} \cos \gamma & 0 & \sin \gamma \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \gamma & 0 & \cos \gamma \end{pmatrix}.$$

В частности, вектор-база A_{12} , проекции (x_{12}, y_{12}, z_{12}) которого измерены в неподвижной системе координат, после поворота платформы вокруг оси Z на угол α изменит свое пространственное положение, и его проекции после поворота (относительно неподвижной системы координат $X_0 Y_0 Z_0$) будут определяться выражением:

$$A_{12}(\alpha) = A(\alpha)A_{12}$$

$$\begin{pmatrix} x_{12}(\alpha) \\ y_{12}(\alpha) \\ z_{12}(\alpha) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha & 0 \\ \sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_{12} \\ y_{12} \\ z_{12} \end{pmatrix}.$$

В общем случае, когда совершаются повороты вокруг трех осей, справедливо следующее выражение:

$$A_{12}(\alpha, \beta, \gamma) = A(\alpha)A(\beta)A(\gamma)A_{12}.$$

Для определения пространственного положения платформы вычисляются координаты векторов-баз $A_{ij}(\alpha, \beta, \gamma)$ для всех возможных угловых положений платформы с заданным шагом (сканированием). В общем случае при наличии k источников излучения на каждом шаге сканирования для всех векторов-баз A_{ij} производится вычисление теоретической эталонной разности фаз $\Delta\phi_{эт.ij}^l$, где $l = 1, 2, \dots, k$.

Точность определения пространственной ориентации объекта напрямую связана с точностью определения пеленга. Поэтому, как правило, решаются одновременно две задачи: определение направления на источник излучения и определение пространственных углов наклона объекта. Повышение точности определения пространственных углов объекта представляет интерес для электронной стабилизации видео-фотосъемки с беспилотных летательных аппаратов, нахождения текущих значений углов наклона корабля (автомобиля) при нестационарном движении в экстремальных условиях и пр.

Платформа в одной плоскости. Рассмотрим прежде всего простейший случай объекта (платформы) при использовании одного вектора-базы A_{12} с проекциями (x_{12}, y_{12}) , лежащего в плоскости XY (см. рис. 2 а) и одного источника излучения, положение которого характеризуется углом в азимутальной плоскости – μ .

Введем следующие допущения: источник излучения находится на достаточно большом расстоянии от объекта, и от него распространяется

плоская волна, имеющая длину λ ; диапазон углов поворота платформы составляет от 0 до 360 градусов.

Рассмотрим определение угла α пространственного положения платформы. Для этого система координат XYZ платформы будет поворачиваться вокруг оси Z относительно неподвижной системы координат $X_0Y_0Z_0$ во всем диапазоне углов α от 0 до 360 градусов с шагом $\Delta\alpha$.

В начальный момент времени координат XYZ платформы совпадает с неподвижной системой координат $X_0Y_0Z_0$, т. е. угол поворота α равен нулю (рис. 2 а). Тогда для проекций вектора-базы $(x_{12}(0), y_{12}(0))$ эталонный набег волны $R_{\text{эт.12}}(0)$ и эталонная разность фаз $\Delta\varphi_{\text{эт.12}}(0)$ определяются очевидными выражениями:

$$R_{\text{эт.12}}(0) = x_{12}(0)\sin(\mu) + y_{12}(0)\cos(\mu)$$

$$\Delta\varphi_{\text{эт.12}}(0) = \frac{2\pi}{\lambda}R_{\text{эт.12}}(0)$$

Заметим, что если направление на источник излучения будет перпендикулярно вектору-базе, то эталонный набег волны будет равен нулю.

При построении теоретической зависимости эталонной разности фаз от угла поворота платформы, задается шаг поворота $\Delta\alpha$, величина которого определяется требуемой точностью построения $\Delta\varphi_{\text{эт.12}}(\alpha) = f(\Delta\alpha)$.

При повороте платформы по азимуту относительно начального положения на величину $\Delta\alpha$ (рис. 2 б), рассчитываются новые проекции вектора-базы $A_{12}(\Delta\alpha)$ относительно неподвижной системы координат $X_0Y_0Z_0$

$$A_{12}(\Delta\alpha) = A_\alpha A_{12},$$

а также набег волны $R_{12}(\Delta\alpha)$ и эталонная раз-

ность фаз $\Delta\varphi_{\text{эт.12}}(\Delta\alpha)$:

$$R_{\text{эт.12}}(\Delta\alpha) = x_{12}(\Delta\alpha)\sin(\mu) + y_{12}(\Delta\alpha)\cos(\mu)$$

$$\Delta\varphi_{\text{эт.12}}(\Delta\alpha) = \frac{2\pi}{\lambda}R_{\text{эт.12}}(\Delta\alpha)$$

Подобным образом перебираются все n возможных значений угла азимута в интервале от 0 до 360° с шагом $\Delta\alpha$ (рис. 2 в).

Рассмотрим построение эталонной разности фаз для вектора-базы длиной $d = \lambda/2$ и угла μ , характеризующего положение источника в азимутальной плоскости, равного нулю (рис. 3 а). Будем считать, что эталонные разности фаз для всех углов поворота платформы α (рис. 3 б) находятся в диапазоне $[-\pi, \pi]$. Из рисунка видно, что когда направление на источник излучения совпадает с направлением вектора-базы, то эталонная разность фаз максимальна. Эталонный набег волны $R_{\text{эт.12}}(0) = \lambda/2$. Когда направление на источник излучения перпендикулярно направлению вектора-базы, эталонная разность фаз $\Delta\varphi_{\text{эт.12}}(90) = \Delta\varphi_{\text{эт.12}}(270) = 0$ (рис. 3 б). Нетрудно убедиться, что для значений углов α , симметрично расположенных относительно направления на источник излучения, величина эталонной разности фаз будет одинаковой. Это приводит к неоднозначности определения направления вектора-базы на источник излучения.

Точность определения эталонной разности фаз, очевидно, зависит от длины вектора-базы d [4]. Чем больше величина вектора-базы, тем точнее можно вычислить (или определить экспериментальным путем) значения эталонной разности фаз.

Рассмотрим построение эталонной разности фаз для вектора-базы длиной $d = \lambda$ и угла μ , характеризующего положение источника в азимуталь-

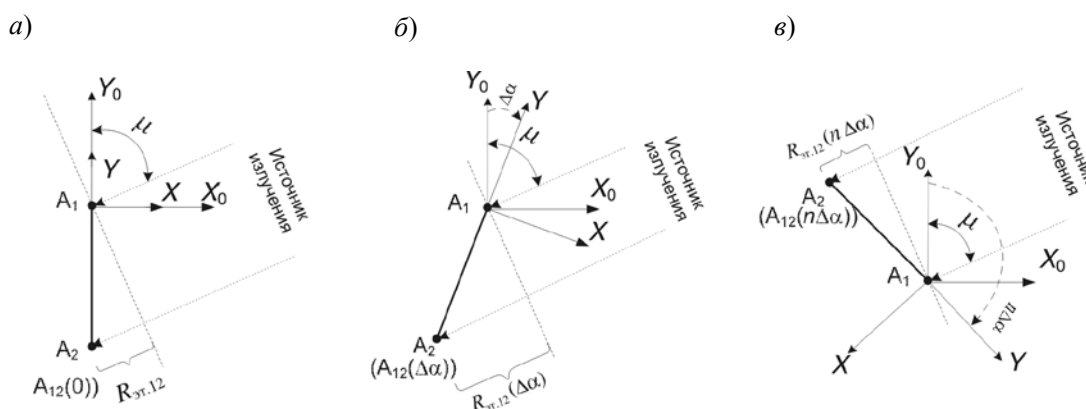


Рис 2. Эталонный набег волны $R_{\text{эт.12}}(\alpha)$ и $\Delta\varphi_{\text{эт.12}}(\alpha)$ в зависимости от угла поворота платформы

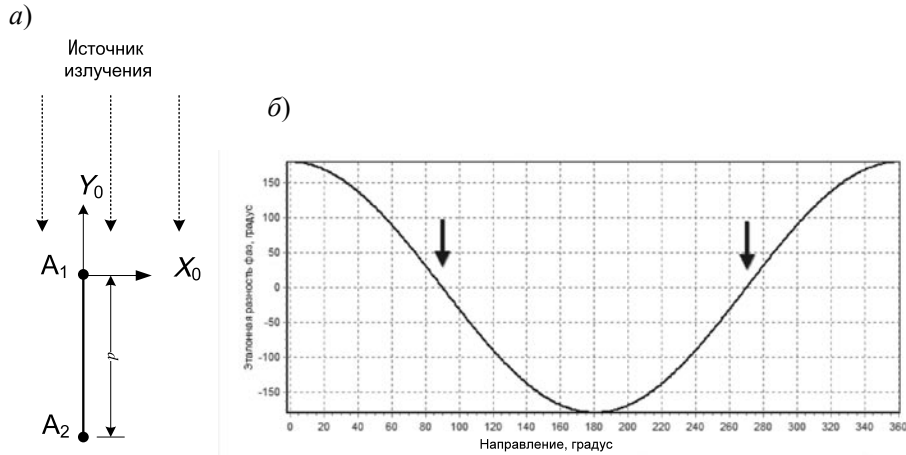


Рис. 3. Эталонные разности фаз при повороте платформы на угол 360° и длине вектора-базы $d = \lambda/2$
а – вектор-база; б – эталонная разность фаз

ной плоскости, равно нулю (рис. 3 а). Видно (рис. 4), что для четырех направлений эталонная разность фаз принимает одинаковые значения. При дальнейшем увеличении расстояния d между антеннами количество направлений (неоднозначность) с одинаковым значением эталонной разности фаз будет увеличиваться.

Таким образом, с одной стороны увеличение вектора-базы приводит к неоднозначности в определении направления на источник излучения, но с другой стороны, при увеличении базы уменьшаются требования к точности определения самих значений эталонной разности фаз. В этой связи необходимо решить задачу устранения указанной неоднозначности при увеличении расстояния между антеннами, при котором обеспечивается заданная точность определения эталонной разности фаз.

Увеличим число векторов-баз. Для двух векторов баз (рис. 5 а), расположенных под углом 90° в направлении на источник излучения в соответ-

ствии с рис. 3 а, получим две независимых функции эталонной разности фаз (на рис. 5 б сплошная кривая соответствует вектору-базе A_{12} , а пунктирная – вектору-базе A_{13}) от величины угла поворота платформы.

Как видно из графиков, не существует углов поворота платформы с одинаковыми парами значений эталонных разностей фаз. Когда направление на источник излучения перпендикулярно направлению вектора-базы A_{12} , эталонная разность фаз $\Delta\varphi_{\text{эт.12}}(90) = \Delta\varphi_{\text{эт.12}}(270) = 0$ (рис. 3 б). Для вектора-базы A_{13} в этих условиях эталонная разность фаз $\Delta\varphi_{\text{эт.13}}(90) = 180^\circ$ и $\Delta\varphi_{\text{эт.13}}(270) = -180^\circ$. Таким образом, неоднозначность в определении направления на источник излучения можно устранить, используя при вычислениях обе функции $\Delta\varphi_{\text{эт.12}}(\Delta\alpha)$ и $\Delta\varphi_{\text{эт.13}}(\Delta\alpha)$ (рис. 5 б).

В общем случае можно показать, что при повороте платформы на угол 360° исключить появление неоднозначностей в определении на-

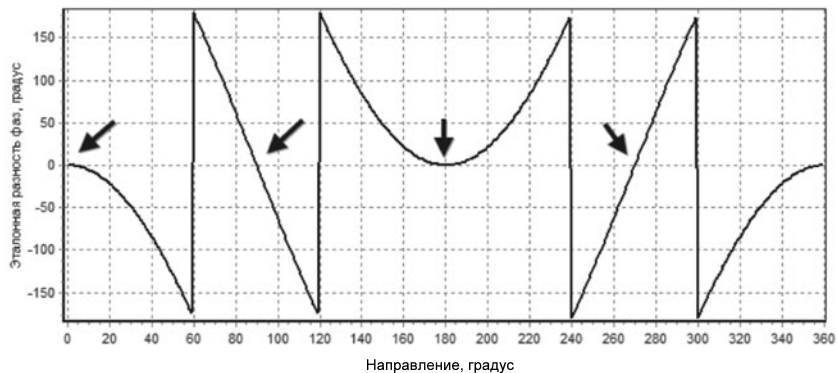


Рис. 4. Эталонные разности фаз при повороте платформы на угол 360° и длине вектора-базы $d = \lambda$

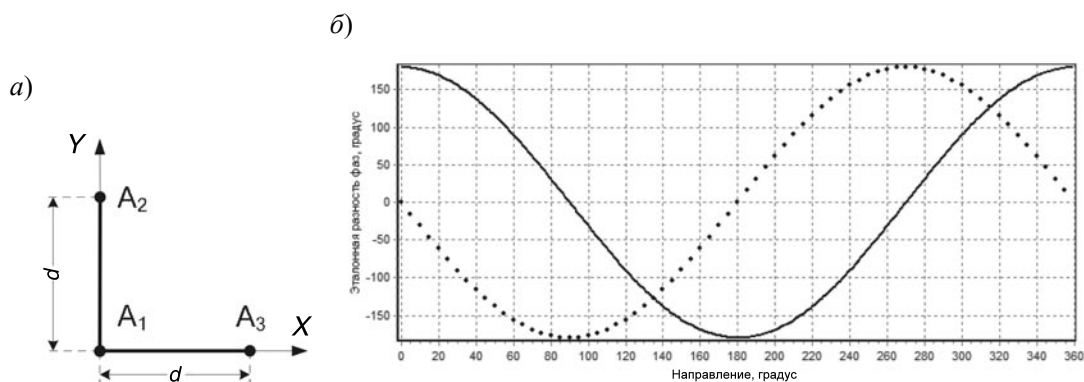


Рис. 5. Эталонные разности фаз при повороте платформы на угол 360° для двух векторов-баз и длине $d = \lambda/2$
 a – векторы-базы; b – эталонные разности фаз

правления на источник излучения можно путем увеличения числа векторов-баз при любой длине векторов-баз.

Рассмотрим три вектора-базы A_{12} , A_{13} , A_{14} , имеющих одну общую антенну A_1 , расположенную в центре координат (рис. 6 а).

Для направления на источник излучения в соответствии с рис. 3 а, получим три независимых функции эталонной разности фаз (на рис. 6 б сплошная кривая соответствует вектору-базе A_{12} , пунктирная – вектору-базе A_{13} , звездочками обозначен – A_{14}) от величины угла поворота платформы.

На рис. 7 а изображены три вектора-базы A_{12} , A_{34} , A_{56} той же длины, произвольно расположенные относительно системы координат. На этом же рисунке (рис.7 б) изображены три независимых функции эталонной разности фаз (на рис. 7 б сплошная кривая соответствует вектору-базе A_{12} , пунктирная – вектору-базе A_{34} , звездочками обозначен – A_{56}) от величины угла поворота платформы.

Сравнивая зависимости на рис. 6 б и рис. 7 б,

можно видеть, что функции эталонной разности фаз представляют собой отрезки гармонического колебания на интервале времени, равному одному периоду, но смещенные на определенную фазу. Легко убедиться, что для расположения векторов-баз в соответствии с рис. 6 а и рис. 7 а, можно устранить неоднозначность в определении направления на источник излучения.

В общем случае для одного источника излучения при произвольной длине векторов-баз и, соответственно, при произвольном числе неоднозначностей, их устранение возможно путем увеличения количества векторов-баз, расположенных на платформе. Можно показать, что существуют расположения векторов-баз на плоскости, позволяющие минимизировать их число с целью устранения неоднозначностей.

Нетрудно убедиться, что при использовании нескольких источников излучения зависимости эталонных разностей фаз будут представлять собой также отрезки гармонического колебания на интервале времени, равном одному периоду, но

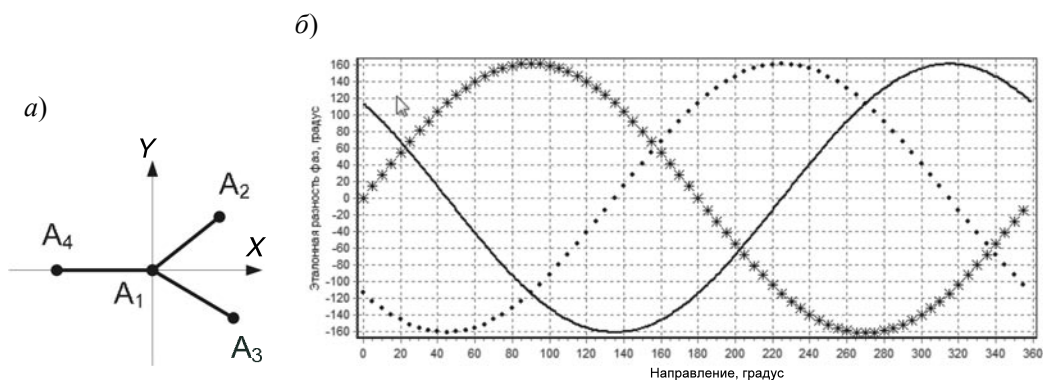


Рис. 6. Эталонные разности фаз для трех векторов-баз и длине $d = \lambda/2$, имеющих общую антенну:
 a – три вектора базы A_{12} , A_{13} , A_{14} ; b – эталонные разности фаз

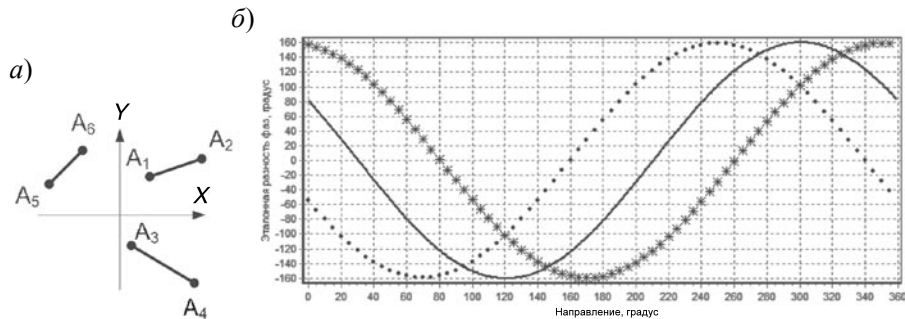


Рис. 7. Эталонные разности фаз для трех векторов-баз и длине $d = \lambda/2$, расположенных на платформе:
а – три вектора-базы A_{12} , A_{34} , A_{56} ; б – эталонные разности фаз

смещенные на определенную фазу, определяемую углом направления на этот источник. Использование дополнительного источника излучения позволяет пропорционально уменьшить количество векторов-баз, расположенных на платформе.

Для определения угла направления платформы на источник излучения необходимо найти для каждого вектора-базы A_{ij} среднее квадратическое отклонение эталонной разности фаз от угла поворота платформы и экспериментально измеренной разности фаз $\Delta\varphi_{изм.ij}$:

$$\Delta\varphi_{ij}(\alpha) = (\Delta\varphi_{эт.ij}(\alpha) - \Delta\varphi_{изм.ij})^2.$$

Под разностью фаз $\Delta\varphi_{изм.ij}$ для вектора-базы A_{ij} понимается разница между мгновенными значениями измеренных фаз $\varphi_{изм.i}$ и $\varphi_{изм.j}$ колебаний, измеренных на выходах приемных устройств, подключенных к антеннам A_i и A_j :

$$\Delta\varphi_{изм.ij} = \varphi_{изм.i} - \varphi_{изм.j}.$$

Для устранения неоднозначности необходимо среднее квадратическое отклонение $\Delta\varphi_{ij}(\alpha)$ усреднить по числу N векторов-баз:

$$\Delta\varphi(\alpha) = \sum_{k=1}^N (\Delta\varphi_{эт.k}(\alpha) - \Delta\varphi_{изм.k})^2.$$

В этом выражении индексы ij заменены на индекс k , обозначающий номер вектора-базы $k = 1, 2, \dots, N$. При наличии нескольких источников излучения усреднение проводится по числу векторов-баз и по числу источников излучения:

$$\Delta\varphi(\alpha) = \sum_{l=1}^m \sum_{k=1}^N (\Delta\varphi'_{эт.k}(\alpha) - \Delta\varphi'_{изм.k})^2,$$

где $\Delta\varphi'_{изм.k}$ – экспериментально измеренная разность фаз колебаний для вектора-базы A_k и l -го источника излучения.

Рассмотрим пример определения среднее квадратического отклонения для двух векторов-баз длиной $d = \lambda$ (см. рис. 5 а) для одного источника излучения. Величина функции $\Delta\varphi_{изм.ij}$ определяется экспериментальным путем и зависит от длины волны колебания источника излучения. В данном примере зададим $\Delta\varphi_{изм.ij}$. Вид функции $\Delta\varphi(\alpha)$ для $N = 2$ приведен на рис. 8.

Если считать известным угол μ , характеризующий положение источника в азимутальной плоскости, то при $\Delta\varphi(\alpha) = 0$ можно определить угол α , характеризующий поворот платформы в азимутальной плоскости. На рис. 8 значение $\alpha = 50^\circ$. Из анализа кривой на рисунке следует, что побочные минимумы функции $\Delta\varphi(\alpha)$ по

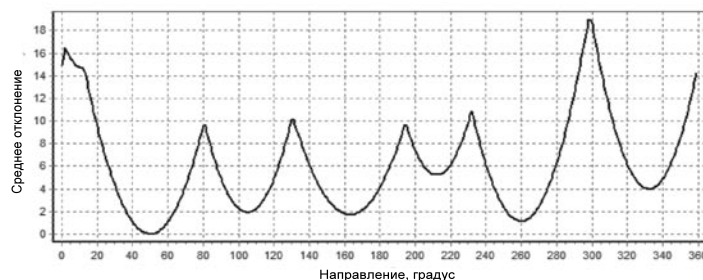


Рис. 8. Среднее квадратическое отклонение $\Delta\varphi(\alpha)$ для двух векторов-баз длиной $d = \lambda$ и одного источника излучения

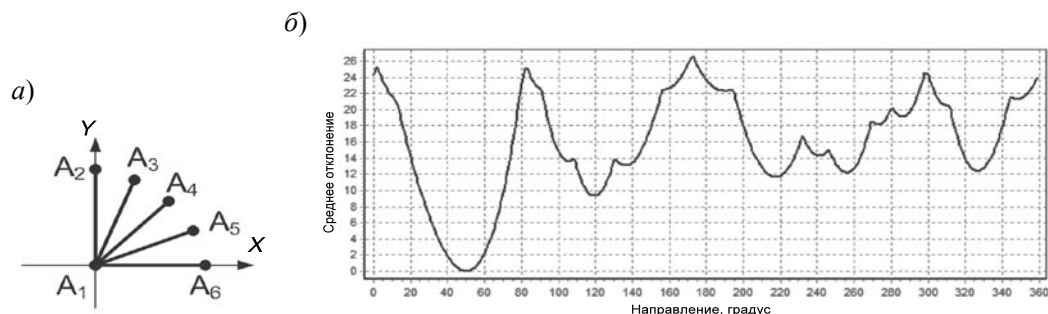


Рис. 9. Среднеквадратическое отклонение $\Delta\varphi(\alpha)$ для пяти векторов-баз длиной $d = \lambda$ и одного источника излучения:
 а – векторы-базы; б – среднеквадратическое отклонение

своему значению достаточно близки к основному (равному 50°) глобальному минимуму функции. Если увеличить количество векторов-баз (рис. 9 а) до пяти, то вид функции $\Delta\varphi(\alpha)$ существенно изменится (рис. 9 б).

Из анализа кривой на рис. 9 б следует, что побочные минимумы функции $\Delta\varphi(\alpha)$ по своему значению существенно отличаются от основного (равному 50°) глобального минимума функции. Таким образом, можно сделать вывод, что с увеличением количества векторов-баз увеличивается соотношение между величиной глобального минимума функции $\Delta\varphi(\alpha)$ и побочными минимальными значениями функции.

Рассмотрим пример определения среднеквадратического отклонения для 12 векторов-баз длиной $d = 2\lambda$. Предположим, что значение угла, характеризующего положение платформы в азимутальной плоскости, изменилось с 50° до 40° . На рис. 10 приведены две функции $\Delta\varphi(\alpha)$: пунктиром обозначена для угла поворота платформы 50° и сплошная – для угла 40° .

Как видно из рисунка, точки глобального минимума смещены на 10° , а ближайшие побочные минимальные значения функции $\Delta\varphi(\alpha)$ по абсолютному значению существенно отличаются от

глобального минимума. В данном примере оба значения глобальных минимумов функций различимы, что определяет точность определения направления на источник излучения при перемещениях платформы, а соответственно, и точность определения пространственного положения платформы. Действительно, если известны координаты источника излучения и значение глобального минимума функции $\Delta\varphi(\alpha)$, легко определить угол поворота платформы в системе координат.

Пространственная модель. При использовании пространственной модели платформа совершает повороты (см. рис. 1) вокруг оси Z_0 (угол курса α), вокруг оси X_0 (угол тангажа β), вокруг оси Y_0 (угол крена γ). Источник излучения колебания находится в произвольной точке пространства и его положение относительно осей координат определяется углами μ и η (рис. 11).

Эталонная разность фаз для одного источника излучения $\Delta\varphi_{\text{эт.12}}$ определяется по координатам проекций вектора-базы $A_{12}(x_{12}, y_{12}, z_{12})$,

$$\Delta\varphi_{\text{эт.12}} = \frac{2\pi}{\lambda} [\cos(\eta)(x_{12} \sin(\mu) + y_{12} \cos(\mu)) + \sin(\eta)z_{12}].$$

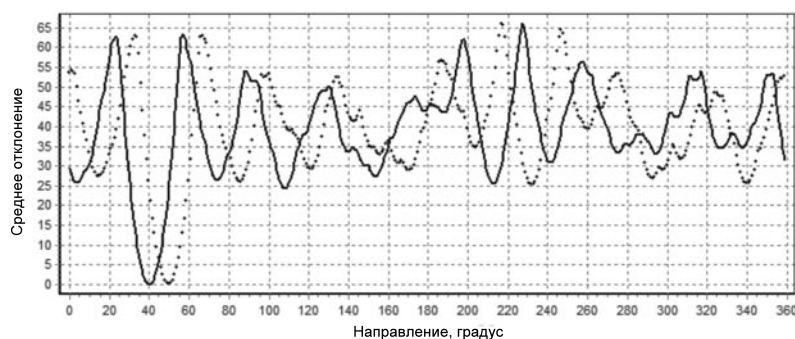


Рис. 10. Среднеквадратическое отклонение $\Delta\varphi(\alpha)$ для 12 векторов-баз длиной $d = 2\lambda$ и одного источника излучения

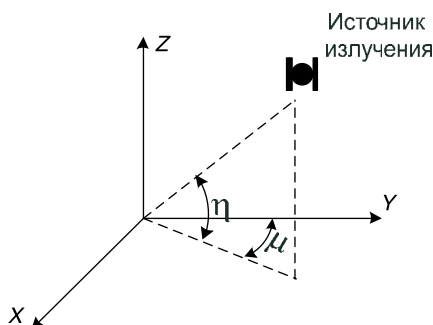


Рис. 11. Положение источника излучения в пространстве

Отличие процедуры определения эталонной разности фаз от случая определения $\Delta\varphi_{\text{эт.12}}$ для платформы в одной плоскости заключается в том, что поворот платформы производится по всем возможным значениям трех углов. Однако, как не трудно убедиться, основные результаты, полученные для случая платформы в одной плоскости, оказываются справедливыми и для пространственной модели.

Показана возможность использования метода эталонной разности фаз для определения

пространственного положения объекта при повороте платформы на угол $0-360^\circ$ в условиях компенсации неоднозначности в определении углов поворота.

Описана возможность повышения точности определения эталонной разности фаз путем увеличения расстояния между антеннами при компенсации неоднозначности в определении углов поворота платформы.

Доказано, что при произвольной длине векторов-баз и, соответственно, при произвольном числе неоднозначностей, их устранение возможно путем увеличения количества векторов-баз, расположенных на платформе.

Показано, что с увеличением количества векторов-баз увеличивается соотношение между величиной глобального минимума функции $\Delta\varphi(\alpha)$ и побочными минимальными значениями функции, что позволяет использовать механизм увеличения количества векторов-баз для уменьшения коэффициента взаимной корреляции при определении максимально достоверного направления на источник излучения в условиях аддитивных помех.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рембовский, А.М. Радиомониторинг. Задачи, методы, средства [Текст] / А.М. Рембовский. –М.: Горячая линия – Телеком, 2000.

2. Фатеев, Ю.Л. Определение пространственной ориентации объектов по сигналам радионавигационных систем ГЛОНАСС/GPS [Электронный ресурс] / Ю.Л. Фатеев // Электронный журнал «Исследовано в России». –2004. –№ 70. –С. 781–791. –Режим доступа: <http://zhurnal.ape.relarn.ru/articles/2004/071.pdf>

3. Ветров, Ю.В. Повышение точности пространственного позиционирования объектов за счет использования сигналов спутниковых навигационных систем

[Текст] / Ю.В. Ветров, А.С. Давыденко, О.В. Царик // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление. –2009. –№ 2 (76). –С. 14–20.

4. Ветров, Ю.В. Анализ влияния канального шума на определение пространственной ориентации объекта при использовании спутниковых навигационных систем [Текст] / Ю.В. Ветров, А.С. Давыденко // Современные проблемы радиоэлектроники: Сб. науч. тр.; науч. ред. Г.Я. Шайдуров; отв. за вып. А.А. Левицкий. –Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2012. –С. 134–139.

REFERENCES

1. Rembovskii A.M. Radiomonitoring. Zadachi, metody, sredstva. – Moskva: Goriachaia liniia – Telekom, 2000. (rus)

2. Fateev Iu.L. Opredelenie prostranstvennoi orientatsii ob'ektov po signalam radionavigatsionnykh sistem GLONASS/GPS / Elektronnyi zhurnal «Issledovano v Rossii». –2004. –№ 70. –S. 781–791. (rus) – Available <http://zhurnal.ape.relarn.ru/articles/2004/071.pdf>

3. Vetrov Iu.V., Davydenko A.S., Tsarik O.V. Povyshenie tochnosti prostranstvennogo pozitsionirovaniia

ob'ektov za schet ispol'zovaniia signalov sputnikovykh navigatsionnykh sistem. / Nauchno-tekhicheskie vedomosti SPbGPU. Informatika. Telekommunikatsii. Upravlenie. –2009. –№ 2 (76). –S. 14–20. (rus)

4. Vetrov Iu.V., Davydenko A.S. Analiz vliianiia kanal'nogo shuma na opredelenie prostranstvennoi orientatsii ob'ekta pri ispol'zovanii sputnikovykh navigatsionnykh sistem / Sovremennye problemy radioelektroniki: sb. nauch. tr.; nauch. red. G.Ia. Shaidurov; отв. за вып. A.A. Levitskii. –Krasnoarsk: Sib. feder. un-t, 2012. –S. 134–139. (rus)