УДК 621.372.542

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ АЛГОРИТМОВ ПЕЛЕНГОВАНИЯ ИСТОЧНИКОВ РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ ФАЗО-КОРРЕЛЯЦИОННЫМИ ПЕЛЕНГАТОРАМИ С ПРОСТРАНСТВЕННЫМ РАСПРЕДЕЛЕНИЕМ ЭЛЕМЕНТОВ ПЕЛЕНГАЦИОННОЙ РЕШЕТКИ

Ю.Т. Карманов, И.И. Заляцкая

MATHEMATICAL MODELS OF ALGORITHMS FOR DIRECTION FINDING OF RADIO-FREQUENCY RADIATION SOURCES BY PHASE CORRELATION DIRECTION FINDERS WITH SPATIAL DISTRIBUTION OF DIRECTION FINDING ARRAY ELEMENTS

Yu.T. Karmanov, I.I. Zalyatskaya

Разработана математическая модель алгоритмов пеленгования источников радиоизлучения (ИРИ) фазо-корреляционного пеленгатора с произвольным распределением в пространстве элементов пеленгационной антенной решетки, учитывающая влияние мешающих факторов в виде неидентичностей каналов и шумов приемных трактов.

Ключевые слова: алгоритм пеленгования, модель, пеленгационная антенная решетка.

Mathematical model of algorithms for direction finding of radio-frequency radiation sources of a phase-correlation direction finder with random spatial distribution of elements by direction finding antenna arrays, taking into account the influence of disturbances in the form of non-identicality of channels and receive paths noises, is developed.

Keywords: algorithm for direction finding, model, direction finding antenna array.

Введение

Цифровые технологии обработки СВЧ-радиосигналов позволяют реализовать пеленгацию источника радиоизлучения (ИРИ) в широком частотном диапазоне при произвольном расположении элементов пеленгационной антенной решетки в пространстве. Это упрощает размещение таких пеленгаторов на малоразмерных объектах (самолеты, дистанционно пилотируемые летательные аппараты, ракеты и т. д.) и создает предпосылки для повышения качества их функционирования.

Вместе с тем при проектировании таких пеленгаторов возникают трудности при исследовании алгоритмов пеленгования из-за отсутствия математических моделей в виде совокупности расчётных соотношений, описывающих процесс пеленгации с учетом произвольного расположения элементов пеленгационной решетки и наличия неидентичностей каналов и внутренних шумов приемного тракта.

В настоящей статье приводится описание одного из вариантов математической модели процесса пеленгования ИРИ.

Постановка задачи

В пространстве выбрана заданная система декартовых координат ZXYс началом в точке O (z=0, x=0, y=0).

В пространстве действует ИРИ на длине волны λ. ИРИ расположен в точке $M_u(z=z_u,\ x=x_u,\ y=y_u)$.

Существует пеленгационная система в виде фазо-корреляционного пеленгатора с произвольным расположением элементов пеленгационной решетки. Она включает в себя [1]:

− опорную антенну, находящуюся в точке $M_{on}(z=z_{on}, x=x_{on}, y=y_{on})$. Диаграмма направленности опорной антенны равномерна в секторе нахождения ИРИ;

− пеленгационные измерительные антенны – N антенн в точках $M_1,\ M_2,\ M_3, \ldots\ M_N$ – $M_i(z=z_i, x=x_i, y=y_i)$ $i=\overline{1,N}$. Диаграммы пеленгационных антенн подобны диаграммам направленно-

Карманов Юрий Трофимович – д-р техн. наук, профессор кафедры инфокоммуникационных технологий, Южно-Уральский государственный университет; ea@drts.susu.ac.ru

Заляцкая Инна Ивановна – аспирант кафедры инфокоммуникационных технологий, Южно-Уральский государственный университет; zalyatskayainna@mail.ru

Yury Trofimovich Karmanov – Doctor of Science (Engineering), professor of Information Communication Technologies Department of South Ural State University; ea@drts.susu.ac.ru

Inna Ivanovna Zalyatskaya – postgraduate student of Information Communication Technologies Department of South Ural State University; zalyatskayainna@mail.ru

сти опорной антенны – равномерные в секторе нахождения ИРИ;

− пеленгационную систему, которая в процессе пеленгации ИРИ проводит измерение фазовых сдвигов между радиосигналами, принимаемыми i-й пеленгационной антенной и опорной антенной – $\varphi_i(\Theta_u,\beta_u)$, $i=\overline{1,N}$, зависящие от азимута Θ_u и угла места β_u ИРИ;

− измеренные значения фазовых сдвигов $\varphi_i(\Theta_u,\beta_u)$, по которым в пеленгационной системе вычисляются значения $\Delta\varphi_{ij}=\varphi_i-\varphi_j$, $i\le j$, $i=\overline{1,N}$, которые используется в пеленгационной системе для оценки значений – (Θ_u,β_u);

− пеленгационную систему, предварительно тестируемую, путем измерения фазовых сдвигов между радиосигналами от i-й антенны и опорной антенны $\varphi_{iT}(\Theta_T(k),\beta_T(k),\lambda_T(n))$, принимаемых тестовых ИРИ (ТИРИ), находящихся на тестовых углах $\Theta_T(k)$, $\beta_T(k)$, $k=\overline{1,M}$ и излучающих последовательность радиосигналов с длинами волн $\lambda_T(n)$, $n=\overline{1,L_T}$. На основе тестовых значений $\varphi_{iT}(\Theta_T(k),\beta_T(k),\lambda_T(n))$ вычисляется массив значений $\Delta_T\varphi_{ij}(\Theta_T(k),\beta_T(k),\lambda_T(n))=\varphi_{iT}(\Theta_T(k),\beta_T(k),\lambda_T(n))-\varphi_{jT}(\Theta_T(k),\beta_T(k),\lambda_T(n))$ $j=\overline{1,N}$, $i=\overline{1,j}$, $k=\overline{1,M}$, $n=\overline{1,L_T}$. Тестовый массив хранится в базе данных пеленгационной системы и используется при вычислении пеленга ИРИ фазо-корреляционным алгоритмом.

Фазо-корреляционный алгоритм пеленгации ИРИ, который заключается [1]

а) в измерении $\varphi_i(\Theta_u,\beta_u,\lambda)$, $i=\overline{1,N}$ и вычисления по ним $\Delta\varphi_i(\Theta_u,\beta_u,\lambda)=\varphi_i(\Theta_u,\beta_u,\lambda)-\varphi_j(\Theta_u,\beta_u,\lambda)$, $i\le j$, $i=\overline{1,N}$.

б) вычислении корреляционной суммы $I(\Theta_T(k),\beta_T(k),\lambda_T(n)/\Theta_u,\beta_u,\lambda)$, где $\lambda_T(n_\lambda)$ – тестовое значение длин волн ТИРИ ближайшее к длине волны λ пеленгуемого ИРИ (определяются по результатам измерения несущей частоты пеленгуемого сигнала) по выражению (1):

$$\begin{cases} I\left(\Theta_T(k),\beta_T(k),\dfrac{\lambda(n_\lambda)}{\Theta_u},\beta_u,\lambda\right)= \\ =\dfrac{2}{N(N-1)}\left[\left(\sum\limits_{\substack{j=1\\ i<j}}^{N}\cos\delta_{ij}\right)^2+\left(\sum\limits_{\substack{j=1\\ i<j}}^{N}\sin\delta_{ij}\right)^2\right], \\ \delta_{ij}=\Delta\varphi_{ij}(\Theta_u,\beta_u,\lambda)-\Delta_T\varphi_{ij}\big(\Theta_T(k),\beta_T(k),\lambda(n_\lambda)\big); \end{cases} \quad (1)$$

в) вычислении пеленгационного сигнала

$$T(\Theta_T(k),\beta_T(k),\lambda_T(n)/\Theta_u,\beta_u,\lambda)= \\ =-10\lg(I(\Theta_T(k),\beta_T(k),\lambda_T(n)/\Theta_u,\beta_u,\lambda)),$$

$\lambda_T(n_\lambda)$ – значение $\lambda_T(n_\lambda)$, $n=\overline{1,L_T}$ ближайшее к длине волны ИРИ – λ;

г) в качестве оценки пеленга ИРИ Θ_u, β_u выбираются значения $\widehat{\Theta}_u=\Theta_T(k_0)$, $\beta_u=\widehat{\beta}_T(k_0)$, при которых пеленгационный сигнал $T(\Theta_T(k),\beta_T(k),\lambda_T(n)/\Theta_u,\beta_u,\lambda)$ достигает своего <u>абсолютного минимума,</u>

$$T\left[\widehat{\Theta}_u=\Theta_T(k_0),\beta_u=\widehat{\beta}_T(k_0)\right]= \\ =Min_{k=\overline{1,L_T}}T(\Theta_T(k),\beta_T(k),\lambda_T(n_\lambda)/\Theta_u,\beta_u,\lambda).$$

Процессу пеленгования мешают следующие факторы:

– наличие шумов в измерительных радиоканалах пеленгатора;

– неидентичности фазовых характеристик антенн, каналов пеленгатора.

Все эти факторы приводят к появлению в измеряемых значениях φ_i паразитных фазовых сдвигов – ε_i, значения которых не связаны с измеряемыми пеленгами.

В математической модели будем полагать, что $\varepsilon_1,\varepsilon_2,\dots\varepsilon_N$ – случайные величины.

Задача состоит в нахождении совокупности математических выражений, позволяющих вычислить пеленгационный сигнал $T(\Theta_T(k),\beta_T(k),\lambda_T(n)/\Theta_u,\beta_u,\lambda)$ по заданным характеристикам пеленгационной системы и заданным значениям $\varepsilon_1,\varepsilon_2,\dots\varepsilon_N$, в сферической и угловой системах координат.

Описание математической модели

Математическая модель алгоритмов пеленгации в сферической системе координат

В задачах радиолокации и радионавигации используется сферическая система координат, изображенная на рис. 1.

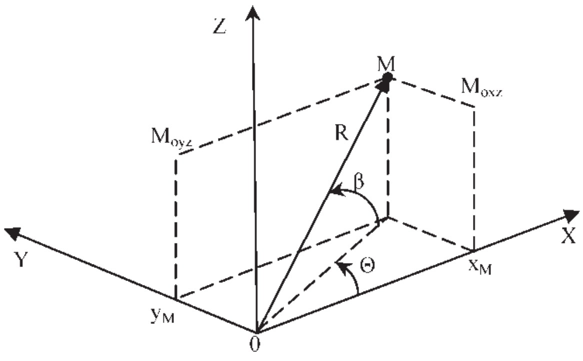

Рис. 1. Сферическая система координат

Координаты точек в сферической системе R, Θ, β связаны с декартовыми координатами соотношениями:

$$\begin{cases} x=R\cdot\cos\beta\cdot\cos\Theta, \\ y=R\cdot\cos\beta\cdot\sin\Theta, \\ z=R\cdot\sin\beta. \end{cases}$$

Фазовый сдвиг между радиосигналами ИРИ, принятыми i-й антенной и опорной антенной, вычисляется в сферической системе координат по выражению:

$$\begin{cases} \varphi_i(\Theta_u, \beta_u, \lambda) = 2\pi \frac{R_i - R_{on}}{\lambda} + \varepsilon_i, \\ \varphi_{iT}(\Theta_\text{T}(\text{k}), \beta_T(k), \lambda_T(n_\lambda)) = 2\pi \frac{R_i - R^*_{on}}{\lambda_T(n_\lambda)} + \varepsilon_{Ti}, \end{cases} \quad (2)$$

где R_i, R_{on} – расстояние между ИРИ и i-й измерительной и опорной антеннами.

Значения R_i, R_{on} вычисляются по выражениям:

$$\begin{cases} R_i = [(x_i - x_u)^2 + (y_i - y_u)^2 + (z_i - z_u)^2]^{1/2}, \\ R_{on} = [(x_{on} - x_u)^2 + (y_{on} - y_u)^2 + (z_{on} - z_u)^2]^{1/2}. \end{cases}$$

Заменяя в данном выражении декартовые координаты на сферические, запишем значения измеряемых φ_i и тестовых φ_{iT}:

$$\begin{cases} \varphi_i\left(\Theta_u, \beta_u, \lambda\right) = \dfrac{2\pi}{\lambda}\left[x_i \cos\beta_u \cos\Theta_u + \right. \\ \qquad \left. + y_i \sin\beta_u \cos\Theta_u + z_i \sin\beta_u\right] + \varepsilon_i, \\ \varphi_{1iT}\left(\Theta_\text{T}\left(\text{k}\right), \beta_T\left(k\right), \lambda_T\left(n_\lambda\right)\right) = \\ \qquad = \dfrac{2\pi}{\lambda_T\left(n_\lambda\right)} x_{iT} \cos\beta_T\left(k\right)\cos\Theta_T\left(k\right), \\ \varphi_{2iT}\left(\Theta_\text{T}\left(\text{k}\right), \beta_T\left(k\right), \lambda_T\left(n_\lambda\right)\right) = \\ \qquad = \dfrac{2\pi}{\lambda_T\left(n_\lambda\right)} y_{iT} \sin\beta_T\left(k\right)\cos\Theta_T\left(k\right) \\ \varphi_{3iT}\left(\Theta_\text{T}\left(\text{k}\right), \beta_T\left(k\right), \lambda_T\left(n_\lambda\right)\right) = \\ \qquad = \dfrac{2\pi}{\lambda_T\left(n_\lambda\right)} z_i \sin\beta_T\left(k\right), \\ \varphi_{iT}\left(\Theta_\text{T}\left(\text{k}\right), \beta_T\left(k\right), \lambda_T\left(n_\lambda\right)\right) = \\ \qquad = \varphi_{1iT} + \varphi_{2iT} + \varphi_{3iT} + \varepsilon_{Ti}, \end{cases} \quad (3)$$

ε_{Ti} – случайные ошибки измерения тестовых фазовых сдвигов φ_{iT}.

Используя выражения (1) и (3), представим выражения для пеленгационного сигнала в сферической системе координат в виде:

$$\begin{cases} \delta_{ij} = \dfrac{2\pi}{\lambda}\left[(x_i - x_j)\cos\beta_u \cos\Theta_\text{u} + \right. \\ \quad + (y_i - y_j)\cos\beta_u \sin\Theta_\text{u} + \\ \quad \left. + (z_i - z_j)\sin\beta_u + (\varepsilon_i - \varepsilon_j)\right] - \\ \quad - \dfrac{2\pi}{\lambda_T\left(n_\lambda\right)}\left[(x_i - x_j)\cos\Theta_\text{T}\left(k\right)\cos\beta_T\left(k\right) + \right. \\ \quad + (y_i - y_j)\sin\beta_T\left(k\right)\cos\Theta_\text{T}\left(k\right) + \\ \quad \left. + (z_i - z_j)\sin\beta_T\left(k\right) + (\varepsilon_{Ti} - \varepsilon_{Tj})\right], \\ T\left(\Theta_\text{T}\left(\text{k}\right), \beta_T\left(k\right), \lambda_T\left(n_\lambda\right) / \Theta_u, \beta_u, \lambda\right) = \\ \quad = -10\lg\left\{\left[\left[\left(\sum\limits_{\substack{j=1 \\ i<j}}^{N} \cos\delta_{ij}\right)^2 + \left(\sum\limits_{\substack{j=1 \\ i<j}}^{N} \sin\delta_{ij}\right)^2\right]\right]\right\}, \\ \lambda_T\left(n_\lambda\right) - \text{значение} \quad \lambda_T\left(n\right), \text{ближайшее к } \lambda. \end{cases} \quad (4)$$

Математическая модель алгоритмов пеленгации в угловой системе координат

Угловая система координат используется в задачах радиоуправления летательными аппаратами. Положение точки М в угловой системе координат характеризуется координатами:

- R – расстояние от начала координат до точки М;
- α_x – горизонтальный угол линии визирования ОМ в плоскости ZOX;
- α_y – вертикальный угол линии визирования ОМ в плоскости ZOY.

Угловая система координат представлена на рис. 2.

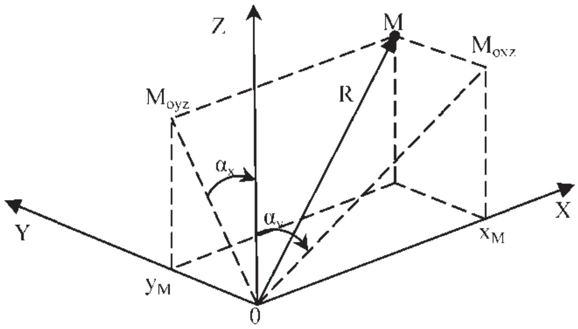

Рис. 2. Угловая система координат

Сферические координаты точки М связаны с угловыми координатами соотношениями:

$$\begin{cases} \operatorname{tg}\Theta = \dfrac{\operatorname{tg}\alpha_y}{\operatorname{tg}\alpha_x}, \\ \left|\sin\beta\right| = \left[1 + \operatorname{tg}^2\alpha_x + \operatorname{tg}^2\alpha_y\right]^{-1/2}. \end{cases}$$

Используя эти соотношения, представим выражения для пеленгационного сигнала в угловой системе координат в виде:

$$\delta_{ij} = \frac{2\pi}{\lambda}\left[\frac{(x_i - x_j)\operatorname{tg}\alpha_x + (y_i - y_j)\operatorname{tg}\alpha_y + (z_i - z_j)}{\left[1 + \operatorname{tg}^2\alpha_x + \operatorname{tg}^2\alpha_y\right]^{\frac{1}{2}}} + \right.$$
$$\left. + (\varepsilon_i - \varepsilon_j)\right] - \frac{2\pi}{\lambda_T(n_\lambda)} \times$$
$$\times\left[\frac{(x_i - x_j)\operatorname{tg}\alpha_{Tx}\left(k\right) + (y_i - y_j \operatorname{tg}\alpha_{Ty}(k) + (z_i - z_j)}{\left[1 + \operatorname{tg}^2\alpha_{Tx} + \operatorname{tg}^2\alpha_{Ty}\right]^{1/2}} + \right.$$
$$\left. + (\varepsilon_{Ti} - \varepsilon_{Tj})\right], \quad (5)$$
$$T\left[\alpha_{Tx}\left(k\right), \alpha_{Ty}\left(k\right), \lambda_T\left(n_\lambda\right) / \alpha_x, \alpha_y, \lambda\right] =$$
$$= -10\lg\left\{\left[\left[\left(\sum\limits_{\substack{j=1 \\ i<j}}^{N} \cos\delta_{ij}\right)^2 + \left(\sum\limits_{\substack{j=1 \\ i<j}}^{N} \sin\delta_{ij}\right)^2\right]\right]\right\},$$

$R \to \infty$; α_x, α_y – угловые координаты ИРИ

$|\alpha_x| \leq 90°$, $|\alpha_y| \leq 90°$; α_{Tx}, α_{Ty} – угловые координаты тестового ИРИ $|\alpha_{Tx}| \leq 90°$, $|\alpha_{Ty}| \leq 90°$.

Заключение

Предложенные математические модели удобно использовать при выборе параметров пеленгаторов путем оперативного моделирования их пеленгационных характеристик для исключения ложных пеленгов, формирования требований к неидентичностям каналов пеленгатора и уровням шумов в них.

В качестве примера, иллюстрирующего сказанное, на рис. 3 приведена пеленгационная характеристика пеленгатора, у которого пеленгационные элементы расположены по спирали на стенках цилиндра диаметром и высотой 30 см, при пеленгации ИРИ с $\Theta_u = 20°$, $\beta_u = 45°$ и λ = 30 см. Ось цилиндра совпадает с осью OZ.

Как следует из рисунка, пеленгатор с такой «экзотической» пеленгационной антенной решеткой имеет пеленгационную характеристику с ярко выраженным минимумом в направлении ИРИ.

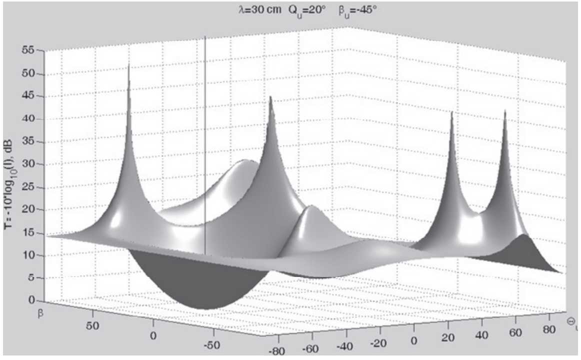

Рис. 3. Пеленгационная характеристика

Ложные минимумы на 10 дБ меньше истинного минимума, что позволяет прогнозировать низкий уровень появления ложных пеленгов.

Литература

1. Рембовский, А.М. Радиомониторинг: задачи, методы и средства / А.М. Рембовский, А.В. Ашихмин, В.А. Козьмин. – М.: Горячая линия – Телеком, 2006. – 492 с.

Поступила в редакцию 15 сентября 2012 г.