

ISSN 1561-8358 (Print)

ISSN 2524-244X (Online)

<https://doi.org/10.29235/1561-8358-2024-69-2-129-138>

УДК 621.396.98



Оригинальная статья

А. А. Дятко^{*}, С. М. Костромицкий, П. Н. Шумский

*Республиканское научно-производственное унитарное предприятие
«Центр радиотехники Национальной академии наук Беларуси»,
ул. П. Бровки, 15/5, каб. 420, 220072, Минск, Республика Беларусь*

**РАЗРАБОТКА И МОДЕЛИРОВАНИЕ
АЛГОРИТМОВ ВЫЧИСЛЕНИЯ РАКУРСА ЦЕЛИ В СИСТЕМЕ КООРДИНАТ
БОРТОВОЙ РАДИОЛОКАЦИОННОЙ СТАНЦИИ**

Аннотация. Разработаны алгоритмы вычисления ракурса цели в системе координат бортовой радиолокационной станции (БРЛС) и выполнено моделирование их работы. Для построения алгоритма вычисления ракурса цели используется неподвижная земная система координат и подвижная система координат БРЛС. Представлены выражения для пересчета декартовых координат объекта из земной системы координат в систему координат бортовой радиолокационной станции. Вводится понятие азимутальной и угломестной плоскости для системы координат БРЛС. Представлены алгоритмы вычисления ракурсов цели в азимутальной и угломестной плоскостях. Показано, что алгоритм вычисления ракурса цели в угломестной плоскости имеет различный вид в зависимости от знака угла места цели. Кроме этого, вид упомянутого алгоритма зависит от того, приближается или удаляется цель от БРЛС. Полученные алгоритмы вычисления ракурса цели используют информацию о координатах скорости цели в системе координат БРЛС. Поскольку координаты вектора скорости в БРЛС не могут быть измерены, то они оцениваются по двум контактам с целью за период обзора. Выполнено моделирование разработанных алгоритмов. Данные алгоритмы могут использоваться при моделировании радиолокационного сигнала, отраженного от движущейся воздушной или наземной цели с учетом ее диаграммы обратного рассеяния.

Ключевые слова: алгоритм, моделирование, система координат, нормализованные координаты, бортовая радиолокационная станция, ракурс цели

Конфликт интересов: в составе авторского коллектива – член редакционной коллегии член-корреспондент Национальной академии наук Беларуси, доктор технических наук, профессор С. М. Костромицкий.

Информация об авторах: Дятко Александр Аркадьевич* – кандидат технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник Республиканского научно-производственного унитарного предприятия «Центр радиотехники Национальной академии наук Беларуси». E-mail: dyatko_a@tut.by; Костромицкий Сергей Михайлович – член-корреспондент Национальной академии наук Беларуси, доктор технических наук, профессор, директор Республиканского научно-производственного унитарного предприятия «Центр радиотехники Национальной академии наук Беларуси». E-mail: sleus@abv.bg; Шумский Петр Николаевич – кандидат технических наук, доцент, заместитель директора по научной работе Республиканского научно-производственного унитарного предприятия «Центр радиотехники Национальной академии наук Беларуси». E-mail: shumski.petr@yandex.by

Вклад авторов: Дятко Александр Аркадьевич – математическое моделирование алгоритмов вычисления ракурса цели в системе координат бортовой радиолокационной станции и графическое представление результатов; Костромицкий Сергей Михайлович – постановка задачи по разработке алгоритмов вычисления ракурса цели в системе координат бортовой радиолокационной станции, обсуждение результатов исследования, редактирование текста рукописи; Шумский Петр Николаевич – разработка алгоритмов вычисления ракурса цели в системе координат бортовой радиолокационной станции.

Для цитирования: Дятко, А. А. Разработка и моделирование алгоритмов вычисления ракурса цели в системе координат бортовой радиолокационной станции / А. А. Дятко, С. М. Костромицкий, П. Н. Шумский // Вест. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2024. – Т. 69, № 2. – С. 129–138. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2024-69-2-129-138>

Поступила в редакцию: 03.10.2023

Утверждена к публикации: 06.06.2024

Подписана в печать: 12.06.2024.

Original article

Alexander A. Dyatko*, Sergei M. Kostromitsky, Petr N. Shumski

*Republican Scientific and Production Unitary Enterprise
“Center of Radio Engineering of the National Academy of Sciences of Belarus”,
15/5, room 420, P. Brovka Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus***DEVELOPMENT AND MODELING OF ALGORITHMS FOR CALCULATING TARGET
ANGLE IN THE COORDINATE SYSTEM OF THE ONBOARD RADAR**

Abstract. The article is devoted to the development of algorithms for calculating the target angle in the coordinate system of an onboard radar and modeling their operation. To construct an algorithm for calculating the target angle, a fixed terrestrial coordinate system and a moving coordinate system of an onboard radar are used. Expressions are presented for recalculating the Cartesian coordinates of an object from the earth coordinate system to the on-board radar coordinate system. The concept of azimuth and elevation planes is introduced for the coordinate system of an onboard radar. Algorithms for calculating target angles in the azimuthal and elevation planes are presented. It is shown that the algorithm for calculating the target angle in the elevation plane has a different form depending on the sign of the target elevation angle. In addition, the type of the mentioned algorithm depends on whether the target is approaching or moving away from the onboard radar. The resulting algorithms for calculating the target angle use information about the coordinates of the target speed in the coordinate system of the onboard radar. Since the coordinates of the velocity vector in the onboard radar cannot be measured, they are estimated from two contacts with the target during the review period. Modeling of the developed algorithms has been carried out.

Keywords: algorithm, modeling, coordinate system, normalized coordinates, onboard radar, target view

Conflict of interest: the author's team includes the member of the Editorial Board Corresponding Member of the National Academy of Sciences of Belarus, Dr. Sci. (Engineering), Professor Sergei M. Kostromitsky.

Information about the authors: *Alexander A. Dyatko** – Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor, Leading Researcher at Republican Scientific and Production Unitary Enterprise “Radio Engineering Center of the National Academy of Sciences of Belarus”. E-mail: dyatko_a@tut.by; *Sergei M. Kostromitsky* – Corresponding Member of the National Academy of Sciences of Belarus, Dr. Sci. (Engineering), Professor, Director at Republican Scientific and Production Unitary Enterprise “Center of Radio Engineering of the National Academy of Sciences of Belarus”. E-mail: sleus@abv.bg; *Petr N. Shumski* – Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor, Deputy Director at Republican Scientific and Production Unitary Enterprise “Radio Engineering Center of the National Academy of Sciences of Belarus”. E-mail: shumski.petr@yandex.by

Contribution of the authors: *Alexander A. Dyatko* – mathematical modeling of algorithms for calculating the target angle in the onboard radar coordinate system and graphical presentation of the results; *Sergei M. Kostromitsky* – formulation of the problem of developing algorithms for calculating the target angle in the coordinate system of the onboard radar, discussion of the research results, editing the text of the manuscript; *Petr N. Shumski* – development of algorithms for calculating the target angle in the onboard radar coordinate system.

For citation: Dyatko A. A., Kostromitsky S. M., Shumski P. N. Development and modeling of algorithms for calculating target angle in the coordinate system of the onboard radar. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-tekhnichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2024, vol. 69, no. 2, pp. 129–138 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2024-69-2-129-138>

Received: 03.10.2023

Approved for publication: 06.06.2024

Signed to the press: 12.06.2024.

Введение. В настоящее время при разработке и модернизации радиолокационных систем важное место отводится детальному математическому моделированию их работы по имитированным отраженным сигналам от заданных типов объектов. При этом необходимо обеспечить достоверность воспроизведения особенностей отраженных от объектов сигналов, содержащихся в законах изменения их амплитуд и фаз [1, 2].

Одной из причин изменения комплексных амплитуд отраженного сигнала является изменение ракурса, то есть угловой ориентации объекта относительно радиолокатора [3–5]. Поэтому при имитации радиолокационных сигналов, отраженных от движущихся воздушных или наземных объектов, возникает необходимость в знании ракурса объекта [6]. Наличие этой информации позволяет проводить имитацию комплексных амплитуд отраженных сигналов с учетом известной зависимости диаграммы обратного рассеяния объекта от углов его ориентации.

В некоторых публикациях (например, [7]) рассматривается решение задачи определения ракурса движущегося летательного аппарата (самолета, ракеты) с помощью размещенного на поверхности Земли неподвижного радиолокатора. Данная проблема является актуальной при моделировании отраженных сигналов не только для наземного радиолокатора, но и для бортового, размещенного на движущемся самолете. В последнем случае решение задачи определения

ракурса движущейся цели усложняется необходимостью учета движения не только цели, но и носителя бортового радиолокатора. Если пренебречь значениями углов скольжения и сноса, а также рысканиями цели и носителя бортового радиолокатора, то, имея информацию о законах перемещения центров масс цели и носителя бортового радиолокатора, можно выполнить оценку ракурса цели относительно бортового радиолокатора и сформировать отраженный сигнал с необходимой комплексной амплитудой. Влияние на амплитуду и фазу отраженного сигнала углов скольжения и сноса, а также рысканий цели и носителя бортового радиолокатора может быть учтено дополнительно.

Таким образом, определение ракурса цели радиолокатором, размещенным на движущемся самолете, является весьма актуальной задачей, поскольку известные авторам исследования по рассматриваемой тематике проводились только для неподвижных радиолокационных систем, размещенных на земной поверхности.

Цель исследования – разработка алгоритмов вычисления ракурса движущейся цели в системе координат бортовой радиолокационной станции и проверка их работы методом моделирования.

Системы координат. Пусть в земной декартовой системе координат (СК) $O_g X_g Y_g Z_g$ по произвольной траектории движется летательный аппарат (ЛА) – носитель БРЛС и воздушная цель (рис. 1). Далее пусть $\vec{R}_g^f = \vec{R}_g^f(x_g^f, y_g^f, z_g^f)$ – радиус-вектор текущего положения носителя БРЛС в земной декартовой СК; $\vec{V}_g^f = \vec{V}_g^f(V_{gm}^f, \beta_{V_g}^f, \varepsilon_{V_g}^f)$ – вектор скорости носителя БРЛС в земной сферической СК, где $V_{gm}^f = |\vec{V}_g^f|$ – модуль вектора скорости, $(\beta_{V_g}^f, \varepsilon_{V_g}^f)$ – соответственно азимут и угол места вектора скорости; $\vec{V}_{g-cs}^f = \vec{V}_{g-cs}^f(V_{gx}^f, V_{gy}^f, V_{gz}^f)$ – вектор скорости носителя БРЛС в земной декартовой СК; $\vec{R}_g^t = \vec{R}_g^t(x_g^t, y_g^t, z_g^t)$ – радиус-вектор текущего положения цели в земной декартовой СК.

При этом, как принято в радиолокации, значения азимута β_g в земной СК отсчитывается в азимутальной плоскости $O_g X_g Z_g$ от координатной оси $O_g X_g$ по часовой стрелке ($0 \leq \beta_g < 2\pi$). Значение угла места ε_g отсчитывается от координатной плоскости $O_g X_g Z_g$ ($0 \leq \varepsilon_g \leq \pi/2$).

Представим, что $OXYZ$ – система координат БРЛС, центр которой совпадает с центром масс ЛА, а ось OX направлена по его строительной оси (рис. 1, 2). В СК БРЛС, сохраняя принятую в радиолокации терминологию, в качестве азимутальной плоскости используем координатную плоскость OXZ . Значение азимута β отсчитывается от координатной оси OX по часовой стрелке ($0 \leq \beta < 2\pi$). Значение угла места ε отсчитывается от координатной плоскости OXZ ($-\pi/2 \leq \varepsilon \leq \pi/2$).

Пусть $\vec{R}^t = \vec{R}^t(x^t, y^t, z^t) = \vec{R}^t(R_m^t, \beta^t, \varepsilon^t)$ – радиус-вектор текущего положения цели соответственно в декартовой и сферической системах координат БРЛС (рис. 1), где $R_m^t = |\vec{R}^t|$ – дальность до цели, (β^t, ε^t) – азимут и угол места цели; $\vec{V}^t = \vec{V}^t(V_m^t, \beta_V^t, \varepsilon_V^t)$ – вектор скорости цели в сферической СК БРЛС, при этом $V_m^t = |\vec{V}^t|$ – модуль вектора скорости, $(\beta_V^t, \varepsilon_V^t)$ – соответственно азимут и угол места вектора скорости.

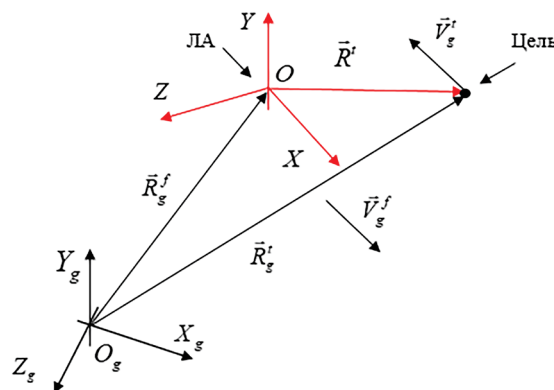


Рис. 1. Взаимное положение носителя бортовой радиолокационной станции и цели в земной системе координат $O_g X_g Y_g Z_g$

Fig. 1. Mutual position of the radar carrier and the target in the earth coordinate system $O_g X_g Y_g Z_g$



Рис. 2. Положение системы координат бортовой радиолокационной станции относительно летательного аппарата [10]

Fig. 2. The position of the radar coordinate system relative to the aircraft [10]

Взаимосвязь координат объектов в земной системе координат и системе координат бортовой радиолокационной станции. При моделировании процесса вычисления ракурсов координаты носителя БРЛС, его вектора скорости, а также координаты цели определяются в неподвижной земной СК $O_g X_g Y_g Z_g$. Измерение же координат цели производится в подвижной СК БРЛС, положение которой в пространстве определяется положением носителя. Отсюда следует необходимость преобразования координат объекта, заданных в земной СК $O_g X_g Y_g Z_g$ при переходе к СК БРЛС $OXYZ$. Для вычисления координат этого объекта (в рассматриваемом случае это наблюдаемая цель) в СК БРЛС $OXYZ$ (см. рис. 1) над земной СК $O_g X_g Y_g Z_g$ необходимо выполнить ряд последовательных преобразований (аффинные преобразования, см. [8]), в результате которых она совмещается с СК БРЛС. В результате значения координат объекта в преобразованной системе координат будут совпадать с их значениями в СК БРЛС.

Выполнив приведенные выше преобразования, можно получить значения заданных в земной СК декартовых координат цели в СК БРЛС. Эти значения будут определяться выражением

$$Pl^t = R_2^S R_1^S T_1^S Pl_g^t = M_{g_БРЛС} Pl_g^t,$$

где $Pl^t = (x^t \ y^t \ z^t \ 1)^T = (P^t \ 1)^T$ – нормализованные [8] декартовы координаты цели в СК БРЛС $OXYZ$, $P^t = (x^t \ y^t \ z^t)^T$ – декартовы координаты цели в СК БРЛС, $Pl_g^t = (x_g^t \ y_g^t \ z_g^t \ 1)^T = (P_g^t \ 1)^T$ – нормализованные декартовы координаты цели в СК $O_g X_g Y_g Z_g$, $P_g^t = (x_g^t \ y_g^t \ z_g^t)^T$ – декартовы координаты цели в земной системе координат, $M_{g_БРЛС} = R_2^S R_1^S T_1^S$ – матрица для пересчета нормализованных декартовых координат

$$\text{объекта из земной СК } O_g X_g Y_g Z_g \text{ в СК БРЛС, } T_1^S = T_1^S(x_g^f, y_g^f, z_g^f) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & -x_g^f \\ 0 & 1 & 0 & -y_g^f \\ 0 & 0 & 1 & -z_g^f \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix},$$

$$R_1^S = R_1^S(\beta_{Vg}^f) = \begin{pmatrix} \cos \beta_{Vg}^f & 0 & \sin \beta_{Vg}^f & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin \beta_{Vg}^f & 0 & \cos \beta_{Vg}^f & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, R_2^S = R_2^S(\varepsilon_{Vg}^f) = \begin{pmatrix} \cos \varepsilon_{Vg}^f & \sin \varepsilon_{Vg}^f & 0 & 0 \\ -\sin \varepsilon_{Vg}^f & \cos \varepsilon_{Vg}^f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

Азимут и угол места цели в СК БРЛС вычисляются в соответствии с выражениями [9]:

$$\beta^t = \arctg\left(\frac{z^t}{x^t}\right) + \frac{\pi}{2} \left[2 - \operatorname{sgn}(z^t) - \operatorname{sgn}(z^t) \operatorname{sgn}(x^t) \right],$$

$$\varepsilon^t = \arctg\left(\frac{y^t}{\sqrt{(x^t)^2 + (z^t)^2}}\right),$$

где $\operatorname{sgn}(x) = \begin{cases} 1, & x \geq 0 \\ -1, & x < 0 \end{cases}$.

Алгоритм вычисления ракурса цели в азимутальной плоскости системы координат бортовой радиолокационной станции. Пусть $S^t = S^t(S_{ms}^t, \beta_S^t, \varepsilon_S^t) = -\vec{R}^t(R_m^t, \beta^t, \varepsilon^t)$ – вектор в СК БРЛС, направленный от цели к началу системы координат, где, $S_{ms}^t = R_m^t$, а параметры $(\beta_S^t, \varepsilon_S^t)$ однозначно определяются через (β^t, ε^t) .

Ракурс цели $\Delta\beta^t$ в азимутальной плоскости СК БРЛС OXZ вычисляется следующим образом:

$$\Delta\beta^t = \begin{cases} \beta_V^t - \beta_S^t & \text{при } \beta_V^t - \beta_S^t \geq 0 \\ 2\pi + (\beta_V^t - \beta_S^t) & \text{при } \beta_V^t - \beta_S^t < 0 \end{cases}. \quad (1)$$

При этом значение ракурса отсчитывается от направления, определяемого вектором $\vec{V}_{ZX}^t$ (проекция вектора $\vec{V}^t$ на азимутальную плоскость OXZ), против часовой стрелки.

На рис. 3 показаны ракурсы цели в азимутальной плоскости при ее различной ориентации в пространстве, где $\vec{S}_{ZX}^t$ – проекция вектора $\vec{S}^t$ на азимутальную плоскость OXZ .

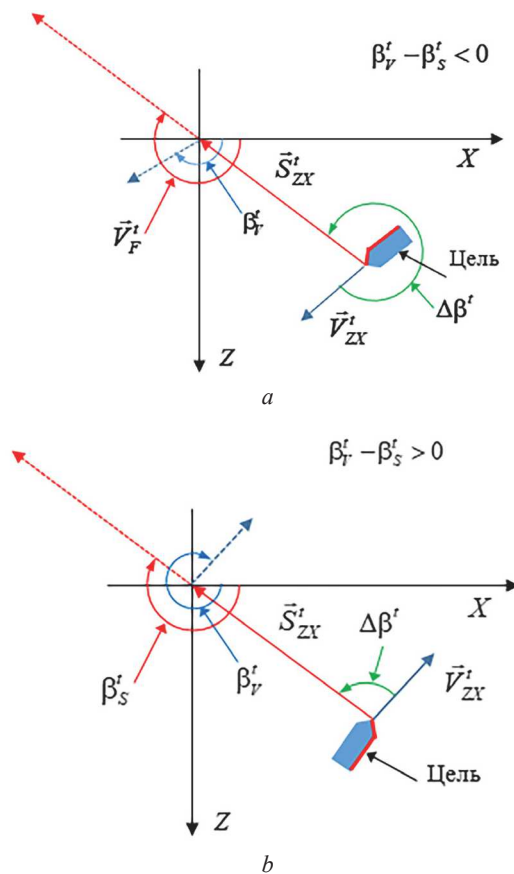


Рис. 3. Ракурс цели в азимутальной плоскости: а – для случая $\beta_V^t - \beta_S^t < 0$, б – для случая $\beta_V^t - \beta_S^t > 0$

Fig. 3. Target view in the azimuthal plane: а – for the case $\beta_V^t - \beta_S^t < 0$, б – for the case $\beta_V^t - \beta_S^t > 0$

Алгоритм вычисления ракурса цели в угломестной плоскости системы координат бортовой радиолокационной станции. В качестве угломестной плоскости положим плоскость F , определяемую векторами $\vec{S}^t$ и $O\vec{Y}$ (рис. 4). Вектор скорости цели $\vec{V}^t$ может как лежать в данной плоскости, так и не принадлежать ей. В нашем случае будем рассматривать проекцию $\vec{V}_F^t$ вектора $\vec{V}^t$ на плоскость F (см. рис. 4).

Отдельно рассмотрим два случая положения цели относительно горизонтальной плоскости OXZ : 1) цель выше или в плоскости OXZ ($\varepsilon^t \geq 0$); 2) цель ниже плоскости OXZ ($\varepsilon^t < 0$).

Алгоритм вычисления ракурса цели $\Delta\varepsilon^t$ в угломестной плоскости для первого случая ($\varepsilon^t \geq 0$) следующий:

- 1) вычислить скалярное произведение векторов $\vec{S}^t$ и $\vec{V}^t$:

$$q = \vec{S}^t \cdot \vec{V}^t;$$

2) если $q \geq 0$ (угол между векторами $\vec{S}^t$ и $\vec{V}^t$ острый или 90° , цель приближается к радиолокационной станции или остается на неизменном расстоянии от нее), то ракурс определяется согласно выражению

$$\Delta\varepsilon^t = \varepsilon_V^t - \varepsilon_S^t; \quad (2)$$

3) если $q < 0$ (угол между векторами $\vec{S}^t$ и $\vec{V}^t$ тупой, цель удаляется от радиолокационной станции), то ракурс рассчитывается следующим образом:

$$\Delta\varepsilon^t = \pi - (\varepsilon_V^t - \varepsilon_S^t). \quad (3)$$

Приведенное описание алгоритма для первого случая иллюстрируется рис. 5, где векторы $\vec{V}^t$ и $\vec{S}^t$ лежат в одной плоскости OYX (плоскость F). При этом положение цели 1 соответствует приближению к БРЛС, а положение 2 – удалению от БРЛС. Положительное значение ракурса отсчитывается от направления, определяемого вектором $\vec{V}^t$ в сторону азимутальной плоскости OXZ ; отрицательное значение ракурса – от направления, определяемого вектором $\vec{V}^t$ в сторону от азимутальной плоскости OXZ .

Алгоритм вычисления ракурса цели $\Delta\varepsilon^t$ в угломестной плоскости F для второго случая ($\varepsilon^t < 0$):

- 1) вычислить скалярное произведение векторов $\vec{S}^t$ и $\vec{V}^t$:

$$q = \vec{S}^t \cdot \vec{V}^t;$$

2) если $q \geq 0$ (угол между векторами $\vec{S}^t$ и $\vec{V}^t$ острый или 90° , цель приближается к радиолокационной станции или остается на неизменном расстоянии от нее), то ракурс определяется согласно выражению

$$\Delta\varepsilon^t = \varepsilon_V^t - \varepsilon_S^t; \quad (4)$$

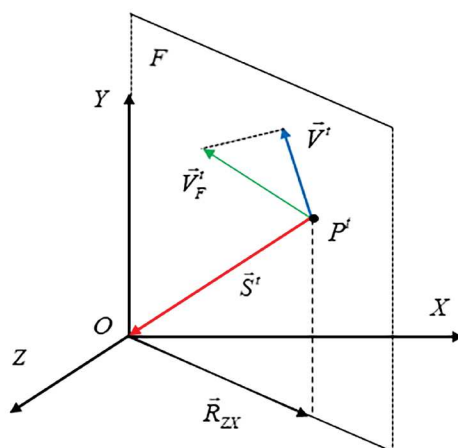


Рис. 4. Угломестная плоскость F в системе координат бортовой радиолокационной станции

Fig. 4. Elevation plane F in the radar coordinate system

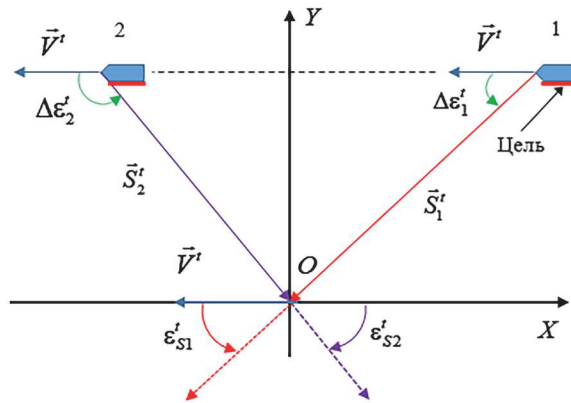


Рис. 5. Ракурс цели в случае приближения и удаления цели от бортовой радиолокационной станции при $\varepsilon' \geq 0$
 Fig. 5. Target angle in case of approach and removal of the target from the radar for $\varepsilon' \geq 0$

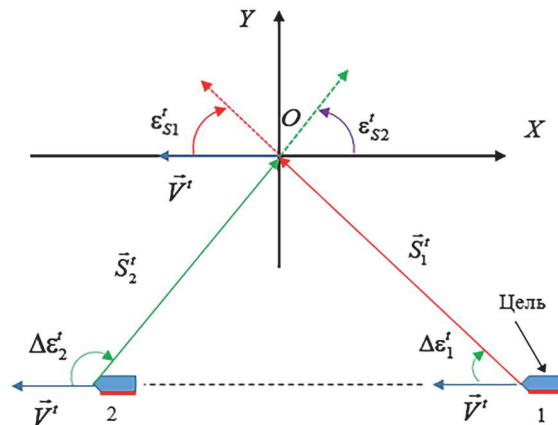


Рис. 6. Ракурс цели в случае приближения и удаления цели от бортовой радиолокационной станции при $\varepsilon' < 0$
 Fig. 6. Target angle in case of approach and removal of the target from the radar for $\varepsilon' < 0$

3) если $q < 0$ (угол между векторами $\vec{S}^t$ и $\vec{V}^t$ тупой, цель удаляется от радиолокационной станции), то ракурс рассчитывается следующим образом:

$$\Delta\varepsilon^t = -\left[\pi + (\varepsilon_V^t - \varepsilon_S^t)\right]. \quad (5)$$

Приведенное описание алгоритма для второго случая иллюстрируется рис. 6, где векторы $\vec{V}^t$ и $\vec{S}^t$ лежат в одной плоскости OYX (плоскость F). При этом положение цели 1 соответствует приближению к БРЛС, а положение 2 – удалению от БРЛС. При этом отрицательное значение ракурса отсчитывается от направления, определяемого вектором $\vec{V}^t$ в сторону азимутальной плоскости OXZ ; положительное значение ракурса – от направления, определяемого вектором $\vec{V}^t$ в сторону от азимутальной плоскости OXZ .

Вычисление вектора скорости цели в системе координат бортовой радиолокационной станции. Как видно из выражений (1)–(5), для вычисления ракурса цели необходимо знать сферические координаты вектора скорости цели в СК БРЛС. Их значения будем вычислять по двум последовательным контактам с целью.

Пусть для некоторого момента времени t_i получены декартовы координаты цели $P_i^t = (x_i^t \ y_i^t \ z_i^t)^T$ в СК БРЛС $(OXYZ)_i$, где $(OXYZ)_i$ – положение СК БРЛС в земной СК в момент времени t_i . Соответственно для момента времени t_{i+1} имеем декартовы координаты цели $P_{i+1}^t = (x_{i+1}^t \ y_{i+1}^t \ z_{i+1}^t)^T$ в СК БРЛС $(OXYZ)_{i+1}$, где $(OXYZ)_{i+1}$ – положение СК БРЛС в земной СК в момент времени t_{i+1} . При этом $T_r = t_{i+1} - t_i$ – период обзора БРЛС.

Поскольку измерение координат цели производится в различных системах координат, то пересчитаем координаты цели из СК $(OXYZ)_i$ в СК $(OXYZ)_{i+1}$.

Пусть $\Delta \vec{R}_g^f = \Delta \vec{R}_g^f (\Delta R_{gx}^f, \Delta R_{gy}^f, \Delta R_{gz}^f) = \vec{R}_{g,i+1} - \vec{R}_{g,i} = \vec{V}_{g_cs}^f T_r$ – вектор смещения носителя БРЛС в земной СК за время, равное периоду обзора БРЛС, где $\Delta R_g^f = (\Delta R_{gx}^f \ \Delta R_{gy}^f \ \Delta R_{gz}^f)^T = (V_{gx}^f \ V_{gy}^f \ V_{gz}^f)^T T_r$ – декартовы координаты вектора смещения. Тогда нормализованные координаты вектора смещения в СК БРЛС будут иметь вид: $\Delta R_1^f = R_2^S R_1^S \Delta R_1^f = M_{gV_БРЛС} \Delta R_1^f$, где $M_{gV_БРЛС} = R_2^S R_1^S$ – матрица пересчета нормализованных координат вектора из земной СК в СК БРЛС, $\Delta R_1^f = (\Delta R_g^f \ 1)^T$, $\Delta R_1^f = (\Delta R_x^f \ 1)^T$ и $\Delta R^f = (\Delta R_x^f \ \Delta R_y^f \ \Delta R_z^f)^T$.

Нормализованные координаты цели, измеренные в СК $(OXYZ)_i$ и пересчитанные в СК $(OXYZ)_{i+1}$, определяются выражением $W1^t = T_1^S (\Delta R_x^f, \Delta R_y^f, \Delta R_z^f) P1_i^t = (W^t \ 1)^T$, где $W^t = (x_w^t \ y_w^t \ z_w^t)^T$.

Значения координат вектора скорости цели в декартовой СК БРЛС, полученных по результатам измерений ее координат, вычисляются следующим образом:

$$\hat{V}_{cs}^t = (\hat{V}_x^t \ \hat{V}_y^t \ \hat{V}_z^t)^T = \frac{P_{i+1}^t - W^t}{T_r} = \frac{1}{T_r} (x_{i+1}^t - x_w^t \ y_{i+1}^t - y_w^t \ z_{i+1}^t - z_w^t)^T.$$

Азимут и угол места вектора скорости цели в СК БРЛС по результатам измерений определяются из выражений [9]:

$$\hat{\beta}_V^t = \arctg \left(\frac{\hat{V}_z^t}{\hat{V}_x^t} \right) + \frac{\pi}{2} \left[2 - \text{sgn}(\hat{V}_z^t) - \text{sgn}(\hat{V}_x^t) \text{sgn}(\hat{V}_y^t) \right],$$

$$\hat{\varepsilon}_V^t = \arctg \left(\frac{\hat{V}_y^t}{\sqrt{(\hat{V}_x^t)^2 + (\hat{V}_z^t)^2}} \right).$$

Моделирование алгоритмов вычисления ракурса цели в системе координат бортовой радиолокационной станции. Анализируемые в настоящей статье алгоритмы оценки ракурса цели в азимутальной и угломестной плоскостях СК БРЛС были смоделированы в пакете Mathcad.

Рассматривались два случая. В первом случае цель движется в плоскости OXY СК БРЛС ($z^t = 0$) по прямолинейной траектории с параметрами вектора скорости: азимут $\beta_V^t = 180^\circ$; угол места $\varepsilon_V^t = 0^\circ$. Угол места цели $\varepsilon^t > 0$. Описанная схема движения цели соответствует рис. 5. Во втором случае изменен только угол места цели, который установлен отрицательным, $\varepsilon^t < 0$. Схема движения цели соответствует рис. 6. Ракурсы вычислялись с временным интервалом, равным периоду обзора БРЛС.

Результаты представлены на рис. 7, 8, где k – номер временного отсчета. На рис. 7 и 8, *a* показаны зависимости ракурсов цели от времени для первого случая соответственно в азимутальной и угломестной плоскостях СК БРЛС. На рис. 8, *b* представлена временная зависимость ракурса цели в угломестной плоскости для второго случая.

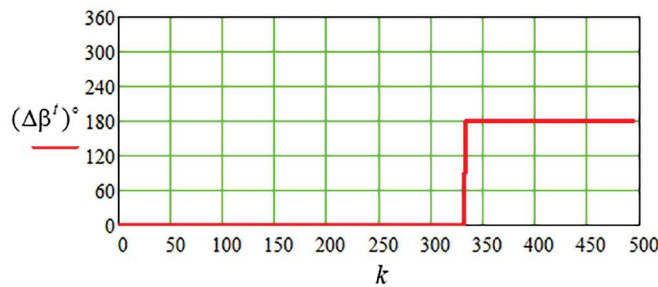


Рис. 7. Изменение ракурса цели в азимутальной плоскости системы координат бортовой радиолокационной станции при ее движении по прямолинейной траектории

Fig. 7. Changing the target's angle in the azimuthal plane of the radar system when it moves along a straight path

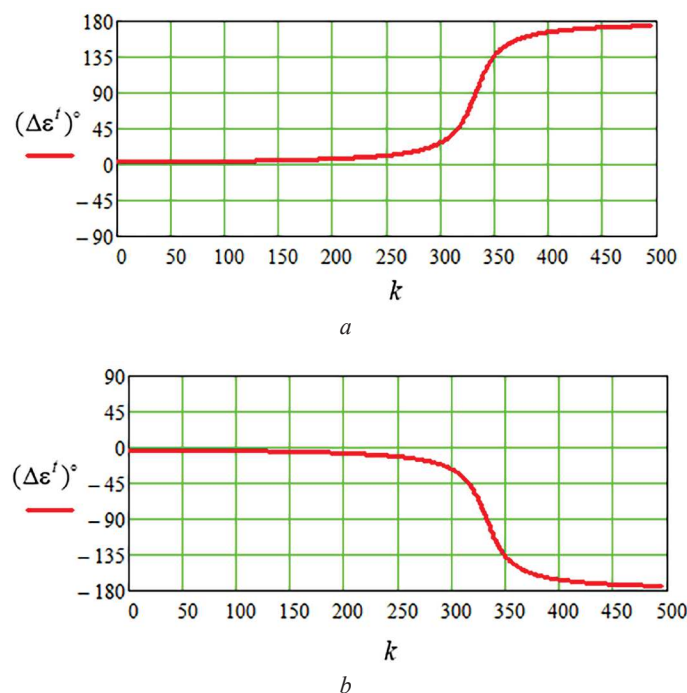


Рис. 8. Изменение ракурса цели в угломестной плоскости системы координат бортовой радиолокационной станции при ее движении по прямолинейной траектории: $a - \varepsilon^t > 0$, $b - \varepsilon^t < 0$

Fig. 8. Changing the target's angle in the elevation plane of the radar system when it moves along a straight path: $a - \varepsilon^t > 0$, $b - \varepsilon^t < 0$

Заклучение. В работе представлены алгоритмы вычисления ракурса цели в азимутальной и угломестной плоскостях системы координат БРЛС. Выполнено моделирование работы полученных алгоритмов. При моделировании рассмотрены случаи, когда цель находится выше ($\varepsilon^t > 0$) и ниже ($\varepsilon^t < 0$) носителя бортовой радиолокационной станции.

Результаты моделирования иллюстрируют поведение ракурса цели во времени в азимутальной и угломестной плоскостях системы координат БРЛС при ее движении по заданной линейной траектории.

Разработанные авторами алгоритмы могут найти применение при моделировании радиолокационного сигнала, отраженного от движущейся воздушной или наземной цели с учетом ее диаграммы обратного рассеяния.

Список использованных источников

1. Радиоэлектронные системы: основы построения и теория: справочник / под ред. Я. Д. Ширмана. – Изд. 2-е, перераб. и доп. – М.: Радиотехника, 2007. – 512 с.
2. Радиолокационные характеристики объектов: методы исследования / А. С. Грибков [и др.]; под ред. С. М. Несетрова. – М.: Радиотехника, 2015. – 312 с.
3. Рассеяние электромагнитных волн воздушными и наземными радиолокационными объектами / О. И. Сухаревский [и др.]; под ред. О. И. Сухаревского. – Харьков: ХУПС, 2009. – 468 с.
4. Слюсарь, Н. М. Рассеяние и вторичная модуляция радиолокационных сигналов динамическими объектами / Н. М. Слюсарь. – Минск: Воен. акад. Респ. Беларусь, 2015. – 288 с.
5. Охрименко, А. Е. Основы радиолокации и радиоэлектронная борьба / А. Е. Охрименко. – М.: Воен. изд-во, 1983. – Ч. 1: Основы радиолокации. – 456 с.
6. Моделирование в радиолокации / А. И. Леонов [и др.]; под ред. А. И. Леонова. – М.: Совет. радио, 1979. – 264 с.
7. Маркович, О. С. Метод определения ракурса воздушной цели по результатам обработки траекторных измерений / О. С. Маркович, А. В. Машкин, Г. В. Сенчаков // Радиотехника. – 2004. – № 5. – С. 37–39.
8. Шикин, Е. В. Компьютерная графика. Динамика, реалистические изображения / Е. В. Шикин, А. В. Боресков. – М.: ДИАЛОГ-МИФИ, 1996. – 288 с.
9. Ширман, Я. Д. Теория и техника обработки радиолокационной информации на фоне помех / Я. Д. Ширман, В. Н. Манжос. – М.: Радио и связь, 1981. – 416 с.
10. Системы координат, применяемые в динамике полета [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://studfile.net/preview/7418563/>

References

1. Shirman Ya. D. (ed.). *Radio-Electronic Systems: Fundamentals of Construction and Theory*. 2nd ed. Moscow, Radiotekhnika Publ., 2007. 512 p. (in Russian).
2. Gribkov A. S., Gribkov V. S., Gromov A. N., Kirillov A. P., Kovalev S. V., Moryakov S. I., Nesterov S. M. [et al.] *Radar Characteristics of Objects: Research Methods*. Moscow, Radiotekhnika Publ., 2015. 312 p. (in Russian).
3. Sukharevskii O. I., Vasilets V. A., Kukobko S. V., Nechitailo S. V., Sazonov A. Z. *Scattering of Electromagnetic Waves by Air and Ground Radar Objects*. Khar'kov, Ivan Kozhedub National Air Force University Publ., 2009. 468 p. (in Russian).
4. Slyusar' N. M. *Scattering and Secondary Modulation of Radar Signals by Dynamic Objects*. Minsk, Military Academy of the Republic of Belarus Publ., 2015. 288 p. (in Russian).
5. Okhrimenko A. Ye. *Fundamentals of Radar and Electronic Warfare. Part 1: Basics of Radar*. Moscow, Military Publ. House, 1983. 456 p. (in Russian).
6. Leonov A. I., Vasenev V. N., Gaydukov Yu. I., Danileiko A. A., Dvornikov F. A., Kononeiko G. V., Iagulviko F. V. [et al.]. *Modeling in Radar*. Moscow, Sovetskoe radio Publ., 1979. 264 p. (in Russian).
7. Markovich O. S., Mashkin A. V., Senchakov G. V. Method for determining the angle of an air target based on the results of processing trajectory measurements. *Radiotekhnika =Radioengineering*, 2004, no. 5, pp. 37–39 (in Russian).
8. Shikin E. V., Boreskov A. V. *Computer Graphics: Dynamics, Realistic Images*. Moscow, DIALOG-MIFI Publ., 1996. 288 p. (in Russian).
9. Shirman Ya. D., Manjos V. N. *Theory and Technique of Processing Radar Information Against the Background of Interference*. Moscow, Radio i svyaz' Publ., 1981. 416 p. (in Russian).
10. *Coordinate systems used in flight dynamics*. Available at: <https://studfile.net/preview/7418563/>