УДК 629.5.05

МОДЕЛЬ И МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ПОГРЕШНОСТЕЙ РАДИОНАВИГАЦИОННОЙ ИНФОРМАЦИИ АВТОМАТИЧЕСКОЙ ИДЕНТИФИКАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ

С.А.Михайлов, Е.О.Орлов
ОДЕССКАЯ НАЦИОНАЛЬНАЯ МОРСКАЯ АКАДЕМИЯ

MODEL AND ESTIMATE METHOD OF ERRORS OF RADIONAVIGATION INFORMATION FROM AUTOMATIC IDENTIFICATION SYSTEM

S.A.Mikhaylov, E.O.Orlov
ODESSA NATIONAL MARITIME ACADEMY

Аннотация. *Предложена математическая модель и методика оценки погрешностей расчета параметров сближения морских транспортных судов по данным автоматической идентификационной системы – дистанции кратчайшего сближения и времени движения до точки кратчайшего сближения. Полученные соотношения позволяют сравнить точность расчета параметров сближения судов по данным, которые получены от двух независимых радионавигационных систем: средств автоматической радиолокационной прокладки и автоматической идентификационной системы.*

Annotation. *A mathematics model and estimate method of errors of calculation of parameters of rapprochement of maritime transport ships is offered from data of automatic identification system are distances of the shortest rapprochement of D_{KP} and time of motion to the point of the shortest rapprochement of T_{KR}. Method allows to compare exactness of calculation of parameters of rapprochement of courts to on to information which are got from two independent радионавигационных systems: facilities of automatic radar and automatic identification system.*

Аппаратура автоматической идентификационной системы (АИС) транспортных судов морского и речного флота предназначена для оповещения по радиоканалу ближайшего окружения о параметрах движения данного конкретного судна. В информации, передаваемой по радиоканалу аппаратурой АИС, в составе рапорта, содержится, в частности, информация о местоположении судна. АИС автоматически и непрерывно транслирует в эфир точные координаты судна, полученные с помощью спутниковых радионавигационных систем (СРНС) [1].

Важнейшими параметрами для оценки ситуации при опасном сближении нескольких судов являются дистанция кратчайшего сближения $D_{кр}$ и время движения до точки кратчайшего сближения $T_{кр}$. Когда с высокой точностью известны координаты собственного судна и соседнего судна-цели, возможно по известным формулам вычислить пеленг и дистанцию до цели, а через некоторое время рассчитать параметры сближения – $D_{кр}$ и $T_{кр}$.

В некоторых научных литературных источниках, например [2], утверждается, что точность расчета параметров сближения судов по данным АИС выше, чем при помощи средств автоматической радиолокационной прокладки (САРП). Такие утверждения не сопровождаются соответствующими аналитическими выражениями.

Отчет авторитетного исследовательского центра SML Technologies Ltd [3] посвящен сравнению точности измерения пеленга и дистанции цели, а также курса и скорости цели при помощи САРП и АИС, при этом расчет параметров сближения $D_{кр}$ и $T_{кр}$ не рассматривался.

В работе Лушникова Е.М. [4] произведено сравнение точности вычисления дистанции кратчайшего сближения по данным САРП и АИС. Для упрощения расчетов рассматривалась ситуация, когда за период наблюдений дистанция между судами существенно сокращается, а изменение пеленга судна-цели незначительно. В этом случае среднеквадратическая погрешность (СКП) вычисления дистанции кратчайшего сближения при помощи САРП определяется выражением:

$$\sigma_{D_{KP}}^{ARPA} = \frac{\sqrt{2} D_1 D_2 \sigma_{\Pi}}{\Delta D} \cong \frac{\sqrt{2} D_{CP}^2 \sigma_{\Pi}}{\Delta D},$$

а СКП вычисления дистанции кратчайшего сближения с помощью АИС с точностью до слагаемых второго порядка равняется:

$$\sigma_{D_{KP}}^{AIS} = \frac{2\sqrt{D_1 D_2}\sigma_{GPS}}{\Delta D} \cong \frac{2 D_{CP} \sigma_{GPS}}{\Delta D}.$$

Однако в научных литературных источниках не приведены выражения для определения погрешности пеленга, дистанции и величины $T_{кр}$, а принятые начальные условия решения задачи не дают возможности применять данные соотношения для решения всей совокупности задач расхождения судов, существующих на практике. Поэтому целью данной работы является вывод аналитических выражений и разработка методики для оценки погрешностей расчета параметров сближения судов по данным АИС.

Вычисление пеленга и дистанции судна-цели по его известным координатам осуществляется по следующим формулам:

$$\Pi = arctg\left[\frac{(\lambda_a - \lambda)\cos\varphi_m}{\varphi_a - \varphi}\right]; \quad (1)$$

$$D = \sqrt{(\varphi_a - \varphi)^2 + (\lambda_a - \lambda)^2 \cos^2\varphi_m}, \quad (2)$$

где $\varphi_m = \dfrac{\varphi + \varphi_a}{2}$ - средняя широта;

П – локсодромический угол.

Для перехода от локсодромического угла к истинному пеленгу судна-цели ему присваивается наименование в четвертном счете по правилу: первая буква одноименна с разностью широт, а вторая – с разностью долгот, а для перехода к истинному пеленгу суда-цели в круговом счете можно записать следующее выражение:

$$ИП = \left\| \begin{matrix} \Pi \Rightarrow \Delta\varphi \;\kappa\; \mathrm{N}; \Delta\lambda \;\kappa\; \mathrm{E} \\ 180^\circ - \Pi \Rightarrow \Delta\varphi \;\kappa\; \mathrm{S}; \Delta\lambda \;\kappa\; \mathrm{E} \\ 180^\circ + \Pi \Rightarrow \Delta\varphi \;\kappa\; \mathrm{S}; \Delta\lambda \;\kappa\; \mathrm{W} \\ 360^\circ - \Pi \Rightarrow \Delta\varphi \;\kappa\; \mathrm{N}; \Delta\lambda \;\kappa\; \mathrm{W} \end{matrix} \right\|. \quad (3)$$

Если совместить ось OY правой прямоугольной системы координат с меридианом (положительное направление совпадает с северным направлением меридиана), а ось OX – с параллелью (положительное направление совпадает с восточным направлением параллели), то связь между полярными и прямоугольными координатами определяется выражениями (4)

$$\left.\begin{matrix} x_a - x = (\lambda_a - \lambda)\cos\varphi_m, \; y_a - y = \varphi_a - \varphi \\ \Pi = arctg\,\dfrac{x_a - x}{y_a - y} \\ D = \sqrt{(x_a - x)^2 + (y_a - y)^2} \end{matrix}\right\}. \quad (4)$$

и наглядно иллюстрируется рис. 1.

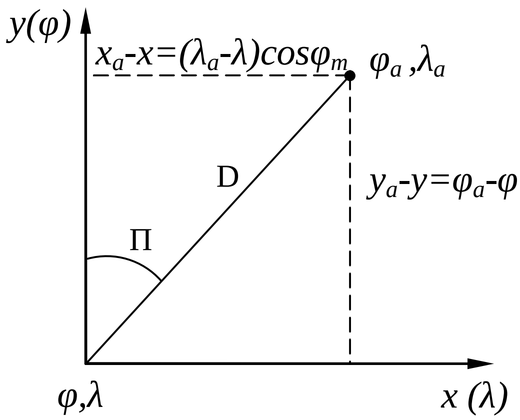

Рис. 1. Связь между прямоугольными и полярными координатами судна-цели

Для формализации методики и вывода соотношений, которые бы позволили оценить погрешности расчета параметров сближения судов по данным АИС, была использована формула среднеквадратической погрешности функции. Если функция задана в общем виде $z = f(x, y, ..., n)$, а результаты измерений независимы, СКП функции может быть получена по формуле (5):

$$\sigma_z = \sqrt{\left(\frac{\partial z}{\partial x}\right)^2 \sigma_x{}^2 + \left(\frac{\partial z}{\partial y}\right)^2 \sigma_y{}^2 + ... + \left(\frac{\partial z}{\partial n}\right)^2 \sigma_n{}^2} \,. \tag{5}$$

Для нахождения СКП определения пеленга по данным АИС, применим выражение (5) к формуле $\Pi = arctg\,\frac{x_a - x}{y_a - y}$, для чего найдем частные производные:

$$\frac{\partial \Pi}{\partial x} = -\frac{1}{(y_a - y)\left(\frac{(x_a - x)^2}{(y_a - y)^2} + 1\right)};$$

$$\frac{\partial \Pi}{\partial x_a} = \frac{1}{(y_a - y)\left(\frac{(x_a - x)^2}{(y_a - y)^2} + 1\right)};$$

$$\frac{\partial \Pi}{\partial y} = \frac{x_a - x}{(y_a - y)^2\left(\frac{(x_a - x)^2}{(y_a - y)^2} + 1\right)};$$

$$\frac{\partial \Pi}{\partial y_a} = -\frac{x_a - x}{(y_a - y)^2\left(\frac{(x_a - x)^2}{(y_a - y)^2} + 1\right)}.$$

Подставляя значения частных производных в выражение (5) получаем:

$$\sigma_{\Pi} = \sqrt{\left(-\frac{1}{(y_a - y)\left(\frac{(x_a - x)^2}{(y_a - y)^2} + 1\right)}\right)^2 \sigma_x^{\ 2} + \left(\frac{1}{(y_a - y)\left(\frac{(x_a - x)^2}{(y_a - y)^2} + 1\right)}\right)^2 \sigma_{x_a}^{\ 2} + \left(\frac{x_a - x}{(y_a - y)^2\left(\frac{(x_a - x)^2}{(y_a - y)^2} + 1\right)}\right)^2 \sigma_y^{\ 2} + \left(-\frac{x_a - x}{(y_a - y)^2\left(\frac{(x_a - x)^2}{(y_a - y)^2} + 1\right)}\right)^2 \sigma_{y_a}^{\ 2}}\ . \qquad (6)$$

Учитывая, что σ_x, σ_y - это равные между собой среднеквадратические ошибки определения ортогональных составляющих (долготы и широты соответственно) координат собственного судна, которые являются полуосями среднеквадратического эллипса погрешностей, введем следующее обозначение:

$$\sigma_x = \sigma_y = \sigma_{x,y}\ .$$

Также учитывая, что $\sigma_{x_a}, \sigma_{y_a}$ - это равные между собой среднеквадратические ошибки определения ортогональных составляющих (долготы и широты соответственно) координат судна-цели, аналогично введем обозначение:

$$\sigma_{x_a} = \sigma_{y_a} = \sigma_{x_a, y_a}\ .$$

Принимая эти обозначения, после упрощения выражения (6) получим:

$$\sigma_{\Pi} = \frac{\sqrt{\sigma_{x,y}^{\ 2} + \sigma_{x_a,y_a}^{\ 2}}}{D}\ . \qquad (7)$$

Для нахождения СКП определения дистанции по данным АИС, применим выражение (5) к формуле

$$D = \sqrt{(x_a - x)^2 + (y_a - y)^2}\ ,$$

для чего получим частные производные:

$$\frac{\partial D}{\partial x} = -\frac{x_a - x}{\sqrt{(x_a - x)^2 + (y_a - y)^2}};$$
$$\frac{\partial D}{\partial x_a} = \frac{x_a - x}{\sqrt{(x_a - x)^2 + (y_a - y)^2}};$$
$$\frac{\partial D}{\partial y} = -\frac{y_a - y}{\sqrt{(x_a - x)^2 + (y_a - y)^2}};$$
$$\frac{\partial D}{\partial y_a} = \frac{y_a - y}{\sqrt{(x_a - x)^2 + (y_a - y)^2}}.$$

Подставляя значения частных производных в выражение (5) получаем:

$$\sigma_D = \sqrt{\left(-\frac{x_a - x}{\sqrt{(x_a - x)^2 + (y_a - y)^2}}\right)^2 \sigma_x{}^2 + \left(\frac{x_a - x}{\sqrt{(x_a - x)^2 + (y_a - y)^2}}\right)^2 \sigma_{x_a}{}^2 +}$$
$$\sqrt{+\left(-\frac{y_a - y}{\sqrt{(x_a - x)^2 + (y_a - y)^2}}\right)^2 \sigma_y{}^2 + \left(\frac{y_a - y}{\sqrt{(x_a - x)^2 + (y_a - y)^2}}\right)^2 \sigma_{y_a}{}^2}. \qquad (8)$$

После упрощения выражения (8) получим:

$$\sigma_D = \sqrt{\sigma_{x,y}{}^2 + \sigma_{x_a,y_a}{}^2}. \qquad (9)$$

Полученные аналитические выражения (7) и (9) для расчета погрешностей определения пеленга и дистанции по данным АИС имеют вид формул модулей градиентов соответствующих навигационных параметров с той лишь разницей, что в качестве коэффициентов пропорциональности содержат значения СКП определения места судна при помощи СРНС.

В работе [5] приведены геометрические построения и вывод формул для вычисления параметров сближения судов $D_{КР}$ и $T_{КР}$.

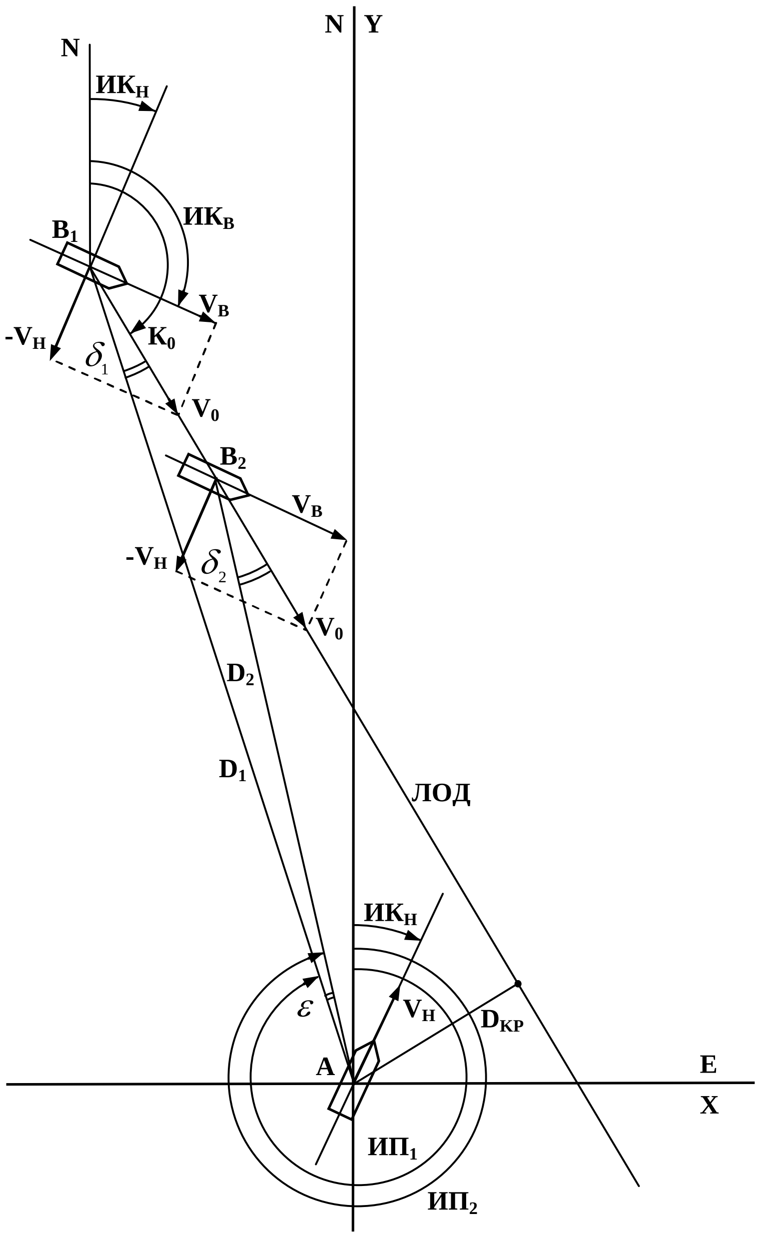

Рис. 2. Определение параметров сближения судов

Введем вспомогательный угол ε, который равняется разности пеленгов $ИП_2$ и $ИП_1$ на встречное судно:

$$\varepsilon = ИП_2 - ИП_1 \tag{10}$$

Полагая далее, что за промежуток времени Δt судно В по линии относительного движения (ЛОД) прошло путь *l*, который определяется отрезком B_1B_2, получим:

$$l^2 = D_1^2 + D_2^2 - 2D_1D_2\cos\varepsilon\,. \tag{11}$$

Поскольку

$$\delta_2 = \delta_1 + \varepsilon\,;\ D_{KP} = D_2 \sin\delta_2$$

и по теореме синусов

$$\frac{l}{\sin\varepsilon} = \frac{D_2}{\sin\delta_1}\,,$$

получаем:

$$D_{KP} = D_2(\sin\varepsilon\cos\delta_1 + \cos\varepsilon\sin\delta_1)\,;$$

$$\sin\delta_1 = \frac{D_2\sin\varepsilon}{l}$$

или

$$D_{KP} = D_2\left[\sin\varepsilon\cos\left(\arcsin\frac{D_2\sin\varepsilon}{l}\right) + \cos\varepsilon\sin\left(\arcsin\frac{D_2\sin\varepsilon}{l}\right)\right]. \quad (12)$$

Воспользуемся соотношением (11):

$$\cos\left(\arcsin\frac{D_2\sin\varepsilon}{l}\right) = \cos\left[\arccos\sqrt{1-\frac{D_2^2\sin^2\varepsilon}{l^2}}\right] = \sqrt{1-\left(\frac{D_2\sin\varepsilon}{l}\right)^2}\,;$$

$$\sqrt{l^2 - D_2^2\sin^2\varepsilon} = D_1 - D_2\cos\varepsilon\,;$$

$$\sin\left(\arcsin\frac{D_2\sin\varepsilon}{l}\right) = \frac{D_2\sin\varepsilon}{l}\,.$$

Тогда выражение (12) перепишется в виде:

$$D_{KP} = D_2\left(\sin\varepsilon\frac{D_1 - D_2\cos\varepsilon}{l} + \cos\varepsilon\frac{D_2\sin\varepsilon}{l}\right).$$

Окончательно получим:

$$D_{KP} = \frac{D_1 D_2\sin\varepsilon}{\sqrt{D_1^2 + D_2^2 - 2D_1D_2\cos\varepsilon}}\,. \quad (13)$$

Из рис. 2 также следует:

$$T_{KP} = \frac{\sqrt{D_2^2 - D_{KP}^2}}{V_0}\,.$$

После преобразований получаем:

$$T_{KP} = \frac{D_2(D_2 - D_1\cos\varepsilon)}{V_0\sqrt{D_1^2 + D_2^2 - 2D_1D_2\cos\varepsilon}}\,.$$

Учитывая, что

$$V_0 = \frac{l}{\Delta t} = \frac{\sqrt{D_1^2 + D_2^2 - 2D_1D_2\cos\varepsilon}}{\Delta t},$$

где Δt – промежуток времени между взятием пеленгов $ИП_1$ и $ИП_2$, образующих угол ε.

Воспользовавшись выражением (10) получим:

$$T_{KP} = \frac{D_2(D_2 - D_1\cos\varepsilon)\Delta t}{D_1^2 + D_2^2 - 2D_1D_2\cos\varepsilon}. \quad (14)$$

Для определения СКП вычисления параметра сближения D_{KP} получим соответствующие частные производные:

$$\frac{\partial D_{KP}}{\partial D_1} = \frac{D_2^2\sin\varepsilon(D_2 - D_1\cos\varepsilon)}{\sqrt{\left(D_1^2 - 2D_1D_2\cos\varepsilon + D_2^2\right)^3}};$$

$$\frac{\partial D_{KP}}{\partial D_2} = \frac{D_1^2\sin\varepsilon(D_1 - D_2\cos\varepsilon)}{\sqrt{\left(D_1^2 - 2D_1D_2\cos\varepsilon + D_2^2\right)^3}};$$

$$\frac{\partial D_{KP}}{\partial \varepsilon} = \frac{D_1D_2(-2D_1D_2\cos^2\varepsilon + D_1^2\cos\varepsilon + D_2^2\cos\varepsilon - D_1D_2\sin^2\varepsilon)}{\sqrt{\left(D_1^2 - 2D_1D_2\cos\varepsilon + D_2^2\right)^3}}.$$

Откуда:

$$\sigma_{D_{KP}} = \sqrt{\left(\frac{D_2^2\sin\varepsilon(D_2 - D_1\cos\varepsilon)}{\sqrt{\left(D_1^2 - 2D_1D_2\cos\varepsilon + D_2^2\right)^3}}\right)^2\sigma_{D_1}^2 + \left(\frac{D_1^2\sin\varepsilon(D_1 - D_2\cos\varepsilon)}{\sqrt{\left(D_1^2 - 2D_1D_2\cos\varepsilon + D_2^2\right)^3}}\right)^2\sigma_{D_2}^2 + \left(\frac{D_1D_2(-2D_1D_2\cos^2\varepsilon + D_1^2\cos\varepsilon + D_2^2\cos\varepsilon - D_1D_2\sin^2\varepsilon)}{\sqrt{\left(D_1^2 - 2D_1D_2\cos\varepsilon + D_2^2\right)^3}}\right)^2\sigma_\varepsilon^2}. \quad (15)$$

В работе [5] указывается, что точность расчета D_{KP} в большей степени зависит от точности измерения курсовых углов (пеленгов), чем от точности измерения дистанций. В большинстве случаев погрешностями определения дистанции можно пренебречь и тогда выражение (15) примет вид:

$$\sigma_{D_{KP}} = \left|\left(\frac{D_1D_2(-2D_1D_2\cos^2\varepsilon + D_1^2\cos\varepsilon + D_2^2\cos\varepsilon - D_1D_2\sin^2\varepsilon)}{\sqrt{\left(D_1^2 - 2D_1D_2\cos\varepsilon + D_2^2\right)^3}}\right)\sigma_\varepsilon\right|. \quad (16)$$

Для получения соотношения для расчета СКП времени до дистанции кратчайшего сближения T_{KP}, применим формулу (5) к выражению (14), для чего отыщем частные производные:

$$\frac{\partial T_{KP}}{\partial D_1} = \frac{\Delta t D_1\left(\left(D_1^2 + D_2^2\right)\cos\varepsilon - 2D_1D_2\right)}{\left(D_1^2 - 2D_1D_2\cos\varepsilon + D_2^2\right)^2};$$

$$\frac{\partial T_{КР}}{\partial D_2} = -\frac{\Delta t D_2\left(\left(D_1^2 + D_2^2\right)\cos\varepsilon - 2D_1D_2\right)}{\left(D_1^2 - 2D_1D_2\cos\varepsilon + D_2^2\right)^2};$$

$$\frac{\partial T_{КР}}{\partial \varepsilon} = \frac{\Delta t D_1 D_2\left(D_1^2 - D_2^2\right)\sin\varepsilon}{\left(D_1^2 - 2D_1D_2\cos\varepsilon + D_2^2\right)^2}.$$

Откуда:

$$\sigma_{T_{КР}} = \sqrt{\left(\frac{\Delta t D_1\left(\left(D_1^2 + D_2^2\right)\cos\varepsilon - 2D_1D_2\right)}{\left(D_1^2 - 2D_1D_2\cos\varepsilon + D_2^2\right)^2}\right)^2 \sigma_{D_1}^2 + \left(-\frac{\Delta t D_2\left(\left(D_1^2 + D_2^2\right)\cos\varepsilon - 2D_1D_2\right)}{\left(D_1^2 - 2D_1D_2\cos\varepsilon + D_2^2\right)^2}\right)^2 \sigma_{D_2}^2 + \left(\frac{\Delta t D_1 D_2\left(D_1^2 - D_2^2\right)\sin\varepsilon}{\left(D_1^2 - 2D_1D_2\cos\varepsilon + D_2^2\right)^2}\right)\sigma_\varepsilon^2}. \quad (17)$$

Анализируя выражение (17) можно заметить, что промежуток времени между измерениями пеленгов и дистанций судна-цели Δt находится в числителе дробей слагаемых подкоренного выражения. Это может вызвать некоторые сомнения, так как известно, что точность расчета параметров сближения судов возрастает с увеличением времени сопровождения цели. Однако, учитывая выражение (11) отметим, что $\sqrt{D_1^2 - 2D_1D_2\cos\varepsilon + D_2^2}$ это расстояние, которое проходит сопровождаемое судно по линии относительного движения за промежуток времени Δt. В этом случае формула (17) может быть переписана в виде:

$$\sigma_{T_{КР}} = \sqrt{\left(\frac{\Delta t D_1\left(\left(D_1^2 + D_2^2\right)\cos\varepsilon - 2D_1D_2\right)}{V_0^2\Delta t^2\left(D_1^2 - 2D_1D_2\cos\varepsilon + D_2^2\right)}\right)^2 \sigma_{D_1}^2 + \left(-\frac{\Delta t D_2\left(\left(D_1^2 + D_2^2\right)\cos\varepsilon - 2D_1D_2\right)}{V_0^2\Delta t^2\left(D_1^2 - 2D_1D_2\cos\varepsilon + D_2^2\right)}\right)^2 \sigma_{D_2}^2 + \left(\frac{\Delta t D_1 D_2\left(D_1^2 - D_2^2\right)\sin\varepsilon}{V_0^2\Delta t^2\left(D_1^2 - 2D_1D_2\cos\varepsilon + D_2^2\right)}\right)\sigma_\varepsilon^2},$$

или после сокращения Δt получим:

$$\sigma_{T_{КР}} = \sqrt{\left(\frac{D_1\left(\left(D_1^2 + D_2^2\right)\cos\varepsilon - 2D_1D_2\right)}{V_0^2\Delta t\left(D_1^2 - 2D_1D_2\cos\varepsilon + D_2^2\right)}\right)^2 \sigma_{D_1}^2 + \left(-\frac{D_2\left(\left(D_1^2 + D_2^2\right)\cos\varepsilon - 2D_1D_2\right)}{V_0^2\Delta t\left(D_1^2 - 2D_1D_2\cos\varepsilon + D_2^2\right)}\right)^2 \sigma_{D_2}^2 + \left(\frac{D_1 D_2\left(D_1^2 - D_2^2\right)\sin\varepsilon}{V_0^2\Delta t\left(D_1^2 - 2D_1D_2\cos\varepsilon + D_2^2\right)}\right)\sigma_\varepsilon^2}. \quad (18)$$

Таким образом, можно сделать вывод, что СКП расчета $T_{КР}$ обратно пропорциональна величине промежутка времени между измерениями Δt и квадрату относительной скорости судов V_0, а выражения (17) и (18) эквивалентны.

Как уже было аргументированно доказано выше, погрешностями определения дистанции можно пренебречь. Тогда выражение (17) принимает вид:

$$\sigma_{T_{KP}} = \left| \left(\frac{\Delta t D_1 D_2 \left(D_1^2 - D_2^2\right) \sin\varepsilon}{\left(D_1^2 - 2D_1 D_2 \cos\varepsilon + D_2^2\right)^2} \right) \sigma_\varepsilon \right| . \qquad (19)$$

Анализируя выражение (19) можно заметить, что числитель дроби содержит синус разности пеленгов. Это означает, что когда ситуация сближения судов развивается таким образом, что пеленг судна-цели не изменяется, а изменяется лишь дистанция между судами, СКП определения величины $T_{КР}$ по формуле (19) будет равняться нулю. Учитывая, что ситуация когда наблюдается сокращение дистанции до судна-цели при неизменности его пеленга, является опасной и существует необходимость с высокой точностью определять погрешности расчета параметров сближения, рекомендуется в этом случае использовать полное выражение (17), а когда изменение пеленга значительно - необходимо пользоваться полным выражением (19). При этом заметим, что незначительным изменением пеленга следует считать такой угол ε, значение синуса которого с точностью до третьей значащей цифры совпадает с его величиной в радианах (ε<7° или 0,122 рад).

Для создания методики практического использования полученных выражений необходимо вывести также аналитическое соотношение для расчета погрешности вычисления вспомогательного угла ε. Согласно выражению (10) угол ε равняется разнице пеленгов между двумя последовательными наблюдениями судна-цели через промежуток времени Δt. Определим СКП вычисления такого вспомогательного угла. Дисперсия разности двух случайных величин при нормальном распределении равняется сумме дисперсий этих двух случайных величин:

$$\mathrm{D(X - Y) = D(X) + D(Y)} , \qquad (20)$$

Поскольку среднеквадратическая погрешность равняется квадратному корню из дисперсии, то СКП разности двух случайных величин определяется как:

$$\sigma_\varepsilon = \sqrt{\sigma_{\Pi_1}^{\ 2} + \sigma_{\Pi_2}^{\ 2}} . \qquad (21)$$

Подставляя в выражение (21) значение СКП расчета пеленгов из уравнения (7) получим:

$$\sigma_\varepsilon = \sqrt{\left(\frac{\sqrt{\sigma_{x,y}^{\ 2} + \sigma_{x_a,y_a}^{\ 2}}}{D_1} \right)^2 + \left(\frac{\sqrt{\sigma_{x,y}^{\ 2} + \sigma_{x_a,y_a}^{\ 2}}}{D_2} \right)^2} . \qquad (22)$$

Переходя к 95% доверительным интервалам можно окончательно записать выражения для оценки точности расчета параметров сближения судов по данным АИС:

$$m_{\Pi_{0,95}} = 1{,}73 \frac{\sqrt{DRMS^2 + DRMS_a^{\ 2}}}{D} ; \qquad (23)$$

$$m_{D_{0,95}} = 1{,}73 \sqrt{DRMS^2 + DRMS_a^{\ 2}} ; \qquad (24)$$

$$m_{\varepsilon_{0,95}} = 1{,}73 \sqrt{\left(\frac{\sqrt{DRMS^2 + DRMS_a^{\ 2}}}{D_1} \right)^2 + \left(\frac{\sqrt{DRMS^2 + DRMS_a^{\ 2}}}{D_2} \right)^2} , \qquad (25)$$

где DRMS, DRMS*a* (Distance Root Mean Squared) – круговая среднеквадратическая ошибка определения места с помощью СРНС собственного судна и судна-цели соответственно.

Полное выражение для расчета погрешности определения параметра D_{KP}:

$$m_{D_{KP0,95}} = \sqrt{\left(\frac{D_2^2 \sin\varepsilon (D_2 - D_1\cos\varepsilon)}{\sqrt{\left(D_1^2 - 2D_1D_2\cos\varepsilon + D_2^2\right)^3}}\right)^2 m_{D_{10,95}}^2 + \left(\frac{D_1^2 \sin\varepsilon (D_1 - D_2\cos\varepsilon)}{\sqrt{\left(D_1^2 - 2D_1D_2\cos\varepsilon + D_2^2\right)^3}}\right)^2 m_{D_{20,95}}^2 + \left(\frac{D_1D_2(-2D_1D_2\cos^2\varepsilon + D_1^2\cos\varepsilon + D_2^2\cos\varepsilon - D_1D_2\sin^2\varepsilon)}{\sqrt{\left(D_1^2 - 2D_1D_2\cos\varepsilon + D_2^2\right)^3}}\right)^2 m_{\varepsilon_{0,95}}^2}, \quad (26)$$

а сокращенное:

$$m_{D_{KP0,95}} = \left|\left(\frac{D_1D_2(-2D_1D_2\cos^2\varepsilon + D_1^2\cos\varepsilon + D_2^2\cos\varepsilon - D_1D_2\sin^2\varepsilon)}{\sqrt{\left(D_1^2 - 2D_1D_2\cos\varepsilon + D_2^2\right)^3}}\right) m_{\varepsilon_{0,95}}\right|. \quad (27)$$

Полное выражение для расчета погрешности определения параметра T_{KP}:

$$m_{T_{KP0,95}} = \sqrt{\left(\frac{\Delta t D_1\left(\left(D_1^2 + D_2^2\right)\cos\varepsilon - 2D_1D_2\right)}{\left(D_1^2 - 2D_1D_2\cos\varepsilon + D_2^2\right)^2}\right)^2 m_{D_{10,95}}^2 + \left(-\frac{\Delta t D_2\left(\left(D_1^2 + D_2^2\right)\cos\varepsilon - 2D_1D_2\right)}{\left(D_1^2 - 2D_1D_2\cos\varepsilon + D_2^2\right)^2}\right)^2 m_{D_{20,95}}^2 + \left(\frac{\Delta t D_1D_2\left(D_1^2 - D_2^2\right)\sin\varepsilon}{\left(D_1^2 - 2D_1D_2\cos\varepsilon + D_2^2\right)^2}\right)^2 m_{\varepsilon_{0,95}}^2}, \quad (28)$$

а сокращенное:

$$m_{T_{KP0,95}} = \left|\left(\frac{\Delta t D_1D_2\left(D_1^2 - D_2^2\right)\sin\varepsilon}{\left(D_1^2 - 2D_1D_2\cos\varepsilon + D_2^2\right)^2}\right) m_{\varepsilon_{0,95}}\right|. \quad (29)$$

Предложенная методика и полученные аналитические соотношения позволяют оценить погрешность расчета параметров сближения морских и речных судов транспортного флота по данным АИС, сравнить ее с аналогичными погрешностями при помощи САРП и, в результате, увеличить точность радионавигационной информации о местоположении объектов.

Литература

1. IALA Guideline No. 1028 On the Automatic Identification System (AIS) Volume 1, Part I, Operational Issues. Edition 1.3, 2004.
2. Судовая автоматическая идентификационная система / А.Н. Маринич, И.Г.Проценко, В.Ю.Резников, Ю.М.Устинов, Р.Н.Черняев, А.Р. Шигабутдинов. Под общ. ред. Ю.М. Устинова. – СПб.: Судостроение, 2004. – 180 с. – ISBN 5-7355-0614-2.
3. Blackler C. F. Association of AIS and Radar Data / MCA Research Project 465. SML Technologies Ltd. – Southampton, 2002.
4. Лушников Е. Использование систем АИС для обеспечения навигационной безопасности // Zeszyty Naukowe Akademii Morskiej w Szczecinie Nr. 2 (74), Explo-Ship–2004, Swinoujscie.
5. Жерлаков А.В., Зимин Н.С., Кононов О.В. Радиолокационные системы предупреждения столкновения судов. – Л.: Судостроение, 1984. – 200 с.