УДК 621.396.96

АЛГОРИТМ ВЫРАБОТКИ ПОПРАВОК ПО ОТНОСИТЕЛЬНОМУ МЕСТОПОЛОЖЕНИЮ И ОРИЕНТАЦИИ СИСТЕМ КООРДИНАТ НОСИТЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ ДАННЫХ ПО ЦЕЛЯМ ОТ ИХ ИСТОЧНИКОВ

Музыченко О. Н., Савченко Д. И.

ОАО Научно-производственная фирма «Меридиан», Санкт-Петербург, Россия (197198, г. Санкт-Петербург, ул. Блохина, д. 19), e-mail: cfdX@list.ru

Перспективным направлением развития систем освещения обстановки подвижных носителей является использование данных по целям от источников информации, расположенных на других носителях. Реализация этого направления сталкивается с проблемой низкой точности получаемых с других носителей координатных данных целей, которая обусловлена во многом большими погрешностями определения относительного (относительно своего объекта) местоположения и ориентации системы координат другого носителя. В статье рассмотрен алгоритм выработки поправок по относительному местоположению и ориентации систем координат двух носителей. Определение поправок осуществляется на основе сопоставления координатных данных из отождествленных формуляров целей от источников информации этих носителей. Использование найденных поправок при пересчете координат целей от источников информации другого носителя позволит существенно повысить точность координатной информации в системе своего носителя.

Ключевые слова: коррекция навигационных данных, источники информации, отождествление.

CORRECTION ALGORITHM FOR RELATIVE LOCATION AND COORDINATE ORIENTATION OF CARRIERS BASED ON TARGETS DATA FED BY THEIR SOURCES

Muzychenko O. N., Savchenko D. I.

Meridian Research and Production Firm, St. Petersburg, Russia (197198, St. Petersburg, street Blokhina, 19), e-mail: cfdX@list.ru

A promising trend of development of situation coverage systems installed in mobile carriers is usage of targets data fed by information sources located at other carriers. Implementation of this concept faces the poor accuracy problem of target coordinates data received from other carriers, which is caused mainly by errors in defining relative (to the own object) location and coordinates orientation of another carrier. The article studies the issue of developing algorithm of making corrections as to a relative location and orientation of coordinates systems of the two carriers. Corrections are values defined by matching the coordinates data from associated target logs fed by the information sources of these carriers. Usage of the found corrections when recalculating target coordinates from information sources of another carrier will contribute to a considerable increase in accuracy of the coordinates information in the system of the own carrier.

Keywords: navigation data correction, information sources, association.

Введение

Перспективным направлением совершенствования систем освещения обстановки (надводной, воздушной и др.) различных объектов является использование данных от источников информации (ИИ), располагаемых на других носителях. Это позволяет существенно расширить контролируемую зону, повысить помехоустойчивость системы, устранить или уменьшить не просматриваемые области и секторы и т.д. Однако реализация указанного направления сталкивается с рядом трудностей, основной из которых является низкая точность получаемых с других носителей координатных данных целей, обусловленная во многом большими погрешностями определения относительного (относительно своего объекта) местоположения и ориентации системы координат (ОМОК) другого носителя. Информация об относительном местоположении носителей с необходимостью используется при пересчете полученных данных о целях в систему координат, связанную со своим объектом, что приводит к существенному увеличению погрешностей по координатам сопровождаемых целей.

Применение спутниковых навигационных систем (СНС) для определения положения обоих объектов отчасти снимает данную проблему. Однако приемниками СНС оснащаются не все носители и их (систем) использование не приводит к повышению точности выработки ориентации систем координат (направления на север). Кроме того, СНС свойственна низкая помехоустойчивость [2].

Перечисленные обстоятельства обуславливают необходимость синтеза алгоритмов, предназначенных для повышения точности определения ОМОК носителей без использования спутниковых навигационных систем, в автономном режиме. Эта задача может решаться за счет совместной обработки данных по целям, вырабатываемых ИИ своего объекта и другого носителя: при наличии решений о тождественности для некоторой совокупности пар формуляров целей от ИИ обоих носителей путем анализа невязок их (формуляров) координатной информации возможна выработка поправок по ОМОК носителей. Под тождественностью пары формуляров целей от разных ИИ понимается решение об их принадлежности одному и тому же реальному объекту. Под формуляром цели – структура, содержащая измеренные источником координаты цели и среднеквадратические погрешности (СКП) их выработки. Отождествление формуляров целей может производиться различными способами, например:

– сопоставлением уникальных идентификационных признаков из формуляров целей от источников носителей (при их наличии);

– ручным привязыванием некоторых формуляров целей оператором;

– автоматическим отождествлением формуляров целей с использованием, например, алгоритмов, рассмотренных в [5, 6].

Синтез алгоритма

В качестве исходных данных для алгоритма выступают два массива, содержащие по L формуляров от ИИ своего объекта и другого носителя, для которых (формуляров) приняты решения о тождественности. Далее без потери общности будем считать, что массивы упорядочены в соответствии с этими решениями, то есть i-ый ($i=\overline{1,L}$; здесь и далее) формуляр в первом массиве (от ИИ своего объекта) отождествлен с i-ым формуляром во втором массиве (от ИИ другого носителя).

Каждый формуляр в n-ом массиве ($n=\overline{1,2}$; здесь и далее) содержит пеленг и дистанцию цели относительно n-ого носителя, выработанные соответствующим ИИ, а также СКП по этим координатам: $d_{n,i}$, $b_{n,i}$, $\sigma_{d_{n,i}}$ и $\sigma_{b_{n,i}}$. СКП $\sigma_{d_{n,i}}$ и $\sigma_{b_{n,i}}$ отражают погрешности измерения координат целей непосредственно ИИ, однако, в полную погрешность по пеленгу на каждую цель также входит погрешность определения ориентации системы координат соответствующего носителя. Эту погрешность можно считать постоянной для всего массива целей от ИИ одного носителя. Соответствующие СКП, обозначаемые σ_{c1} и σ_{c2} (для своего объекта и другого носителя), также входят в совокупность исходных данных.

Кроме того, на вход алгоритма поступают рассчитанные по информации от навигационных систем носителей сдвиги x и y по осям между началами систем координат обоих носителей и СКП определения этих сдвигов σ_x и σ_y.

На основе известных уравнений пересчета координат из системы одного носителя в систему другого носителя может быть записана система из $2 \cdot L$ уравнений (по два уравнения для каждой цели):

$$\begin{cases} d_{2,i} \cdot \sin(b_{2,i}) = d_{1,i} \cdot \sin(b_{1,i}) - x \\ d_{2,i} \cdot \cos(b_{2,i}) = d_{1,i} \cdot \cos(b_{1,i}) - y \end{cases}, \tag{1}$$

где $i = \overline{1, L}$ (здесь и далее при записи всех систем уравнений).

Перенося все слагаемые в левые части и вводя обозначения, получим:

$$\begin{cases} \varphi_{x,i}(d_{1,i}, d_{2,i}, b_{1,i}, b_{2,i}, x, y) = 0 \\ \varphi_{y,i}(d_{1,i}, d_{2,i}, b_{1,i}, b_{2,i}, x, y) = 0 \end{cases}, \tag{2}$$

где $\varphi_{x,i}(d_{1,i}, d_{2,i}, b_{1,i}, b_{2,i}, x, y) = d_{1,i} \cdot \sin(b_{1,i}) - x - d_{2,i} \cdot \sin(b_{2,i})$;

$\varphi_{y,i}(d_{1,i}, d_{2,i}, b_{1,i}, b_{2,i}, x, y) = d_{1,i} \cdot \cos(b_{1,i}) - y - d_{2,i} \cdot \cos(b_{2,i})$.

В уравнения системы (2) входят величины, определенные ИИ и навигационными системами носителей и являющиеся исходными данными для синтезируемого алгоритма. Однако вследствие ошибок измерений при подстановке этих данных в правых частях уравнений (2) будут получены не нули, а значения невязок $w_{x,i}$ и $w_{y,i}$, в общем случае отличных от нуля:

$$\begin{cases} \varphi_{x,i}(d_{1,i}, d_{2,i}, b_{1,i}, b_{2,i}, x, y) = w_{x,i} \\ \varphi_{y,i}(d_{1,i}, d_{2,i}, b_{1,i}, b_{2,i}, x, y) = w_{y,i} \end{cases}. \tag{3}$$

Для того чтобы результаты измерений стали удовлетворять равенствам системы (2), необходимо введение поправок, компенсирующих каждую из погрешностей измерений:

$$\begin{cases}\varphi_{x,i}(d_{1,i}+\upsilon_{d_{1,i}},d_{2,i}+\upsilon_{d_{2,i}},b_{1,i}+\upsilon_{b_{1,i}}+\upsilon_{c1},b_{2,i}+\upsilon_{b_{2,i}}+\upsilon_{c2},x+\upsilon_x,y+\upsilon_y)=0\\ \varphi_{y,i}(d_{1,i}+\upsilon_{d_{1,i}},d_{2,i}+\upsilon_{d_{2,i}},b_{1,i}+\upsilon_{b_{1,i}}+\upsilon_{c1},b_{2,i}+\upsilon_{b_{2,i}}+\upsilon_{c2},x+\upsilon_x,y+\upsilon_y)=0\end{cases},\tag{4}$$

где $\upsilon_{d_{1,i}}$, $\upsilon_{d_{2,i}}$, $\upsilon_{b_{1,i}}$ и $\upsilon_{b_{2,i}}$ – поправки к координатам целей от ИИ носителей;

υ_x, υ_y, υ_{c1} и υ_{c2} – искомые поправки по относительному местоположению и ориентации систем координат носителей.

Система (4) содержит $2\cdot L$ уравнений с $4\cdot L+4$ неизвестными ($\upsilon_{d_{n,i}}$, $\upsilon_{b_{n,i}}$, υ_{c1}, υ_{c2}, υ_x и υ_y) и допускает множество решений. В качестве критерия для выбора одного из них используем принцип наименьших квадратов [4]:

$$\sum_{i=1}^{L}\left(\frac{\upsilon^2_{d_{1,i}}}{\sigma^2_{d_{1,i}}}+\frac{\upsilon^2_{d_{2,i}}}{\sigma^2_{d_{2,i}}}+\frac{\upsilon^2_{b_{1,i}}}{\sigma^2_{b_{1,i}}}+\frac{\upsilon^2_{b_{2,i}}}{\sigma^2_{b_{2,i}}}\right)+\frac{\upsilon^2_x}{\sigma^2_x}+\frac{\upsilon^2_y}{\sigma^2_y}+\frac{\upsilon^2_{c1}}{\sigma^2_{c1}}+\frac{\upsilon^2_{c2}}{\sigma^2_{c2}}\to\min .\tag{5}$$

Целесообразность использования данного критерия обуславливается тем, что при нормальном законе распределения погрешностей он гарантирует нахождение решения, максимизирующего функцию правдоподобия [3].

Задача совместного уравнивания многих величин по методу наименьших квадратов представляет собой задачу поиска условного экстремума. Для ее решения используем способ Лагранжа с неопределенными множителями [4].

Приведем уравнения системы (4) к линейному виду. Для этого разложим функции $\varphi_{x,i}$ и $\varphi_{y,i}$ в ряды Тейлора и отбросим ввиду малости искомых поправок нелинейные члены разложения [4]. Тогда из (4) будет получена система:

$$\begin{cases}\varphi_{x,i}(d_{1,i}+\upsilon_{d_{1,i}},d_{2,i}+\upsilon_{d_{2,i}},b_{1,i}+\upsilon_{b_{1,i}}+\upsilon_{c1},b_{2,i}+\upsilon_{b_{2,i}}+\upsilon_{c2},x+\upsilon_x,y+\upsilon_y)=\\ \qquad=\varphi_{x,i}(d_{1,i},d_{2,i},b_{1,i},b_{2,i},x,y)+\frac{d\varphi_{x,i}}{dd_{1,i}}\cdot\upsilon_{d_{1,i}}+\frac{d\varphi_{x,i}}{dd_{2,i}}\cdot\upsilon_{d_{2,i}}+\\ \quad+\frac{d\varphi_{x,i}}{db_{1,i}}\cdot(\upsilon_{b_{1,i}}+\upsilon_{c1})+\frac{d\varphi_{x,i}}{db_{2,i}}\cdot(\upsilon_{b_{2,i}}+\upsilon_{c2})+\frac{d\varphi_{x,i}}{dx}\cdot\upsilon_x+\frac{d\varphi_{x,i}}{dy}\cdot\upsilon_y=0\\ \varphi_{y,i}(d_{1,i}+\upsilon_{d_{1,i}},d_{2,i}+\upsilon_{d_{2,i}},b_{1,i}+\upsilon_{b_{1,i}}+\upsilon_{c1},b_{2,i}+\upsilon_{b_{2,i}}+\upsilon_{c2},x+\upsilon_x,y+\upsilon_y)=\\ \qquad=\varphi_{y,i}(d_{1,i},d_{2,i},b_{1,i},b_{2,i},x,y)+\frac{d\varphi_{y,i}}{dd_{1,i}}\cdot\upsilon_{d_{1,i}}+\frac{d\varphi_{y,i}}{dd_{2,i}}\cdot\upsilon_{d_{2,i}}+\\ \quad+\frac{d\varphi_{y,i}}{db_{1,i}}\cdot(\upsilon_{b_{1,i}}+\upsilon_{c1})+\frac{d\varphi_{y,i}}{db_{2,i}}\cdot(\upsilon_{b_{2,i}}+\upsilon_{c2})+\frac{d\varphi_{y,i}}{dx}\cdot\upsilon_x+\frac{d\varphi_{y,i}}{dy}\cdot\upsilon_y=0\end{cases}.\tag{6}$$

В (6) значения частных производных вычисляются в точках, соответствующих измерениям ИИ и навигационных систем носителей.

Беря производные и учтя (3), из (6) получим:

$$
\begin{cases}
\varphi_{x,i}(d_{1,i}+\upsilon_{d_{1,i}}, d_{2,i}+\upsilon_{d_{2,i}}, b_{1,i}+\upsilon_{b_{1,i}}+\upsilon_{c1}, b_{2,i}+\upsilon_{b_{2,i}}+\upsilon_{c2}, x+\upsilon_x, \\
\quad y+\upsilon_y) = w_{x,i} + a^x_{d_{1,i}}\cdot\upsilon_{d_{1,i}} + a^x_{d_{2,i}}\cdot\upsilon_{d_{2,i}} + a^x_{b_{1,i}}\cdot(\upsilon_{b_{1,i}}+\upsilon_{c1}) + \\
\qquad + a^x_{b_{2,i}}\cdot(\upsilon_{b_{2,i}}+\upsilon_{c2}) + a^x_{x,i}\cdot\upsilon_x + a^x_{y,i}\cdot\upsilon_y = 0 \\
\varphi_{y,i}(d_{1,i}+\upsilon_{d_{1,i}}, d_{2,i}+\upsilon_{d_{2,i}}, b_{1,i}+\upsilon_{b_{1,i}}+\upsilon_{c1}, b_{2,i}+\upsilon_{b_{2,i}}+\upsilon_{c2}, x+\upsilon_x, \\
\quad y+\upsilon_y) = w_{y,i} + a^y_{d_{1,i}}\cdot\upsilon_{d_{1,i}} + a^y_{d_{2,i}}\cdot\upsilon_{d_{2,i}} + a^y_{b_{1,i}}\cdot(\upsilon_{b_{1,i}}+\upsilon_{c1}) + \\
\qquad + a^y_{b_{2,i}}\cdot(\upsilon_{b_{2,i}}+\upsilon_{c2}) + a^y_{x,i}\cdot\upsilon_x + a^y_{y,i}\cdot\upsilon_y = 0
\end{cases}, \tag{7}
$$

где $a^x_{d_{1,i}} = \sin(b_{1,i})$; $a^x_{d_{2,i}} = -\sin(b_{2,i})$; $a^x_{b_{1,i}} = d_{1,i}\cdot\cos(b_{1,i})$; $a^x_{b_{2,i}} = -d_{2,i}\cdot\cos(b_{2,i})$; $a^y_{y,i} = a^x_{x,i} = -1$; $a^y_{x,i} = a^x_{y,i} = 0$; $a^y_{d_{1,i}} = \cos(b_{1,i})$; $a^y_{d_{2,i}} = -\cos(b_{2,i})$; $a^y_{b_{1,i}} = -d_{1,i}\cdot\sin(b_{1,i})$; $a^y_{b_{2,i}} = d_{2,i}\cdot\sin(b_{2,i})$.

Функция Лагранжа [4] применительно к данной задаче примет вид:

$$
\begin{gathered}
F\left(\upsilon_{d_{1,1}},...,\upsilon_{d_{1,L}},\upsilon_{d_{2,1}},...,\upsilon_{d_{2,L}},\upsilon_{b_{1,1}},...,\upsilon_{b_{1,L}},\upsilon_{b_{2,1}},...,\upsilon_{b_{2,L}},\upsilon_x,\upsilon_y,\upsilon_{c1},\upsilon_{c2}\right) = \frac{\upsilon_x^2}{\sigma_x^2} + \\
+ \sum_{i=1}^{L}\left(\varphi_{x,i}\cdot\lambda_{x,i} + \varphi_{y,i}\cdot\lambda_{y,i}\right) + \sum_{i=1}^{L}\left(\frac{\upsilon^2_{d_{1,i}}}{\sigma^2_{d_{1,i}}} + \frac{\upsilon^2_{d_{2,i}}}{\sigma^2_{d_{2,i}}} + \frac{\upsilon^2_{b_{1,i}}}{\sigma^2_{b_{1,i}}} + \frac{\upsilon^2_{b_{2,i}}}{\sigma^2_{b_{2,i}}}\right) + \frac{\upsilon_y^2}{\sigma_y^2} + \frac{\upsilon_{c2}^2}{\sigma_{c2}^2} + \frac{\upsilon_{c1}^2}{\sigma_{c1}^2}
\end{gathered}, \tag{8}
$$

где $\varphi_{x,i} = \varphi_{x,i}(d_{1,i}+\upsilon_{d_{1,i}}, d_{2,i}+\upsilon_{d_{2,i}}, b_{1,i}+\upsilon_{b_{1,i}}+\upsilon_{c1}, b_{2,i}+\upsilon_{b_{2,i}}+\upsilon_{c2}, x+\upsilon_x, y+\upsilon_y)$;

$\varphi_{y,i} = \varphi_{y,i}(d_{1,i}+\upsilon_{d_{1,i}}, d_{2,i}+\upsilon_{d_{2,i}}, b_{1,i}+\upsilon_{b_{1,i}}+\upsilon_{c1}, b_{2,i}+\upsilon_{b_{2,i}}+\upsilon_{c2}, x+\upsilon_x, y+\upsilon_y)$;

$\lambda_{x,i}$, $\lambda_{y,i}$ – неопределенные множители;

$\sum_{i=1}^{L}\left(\varphi_{x,i}\cdot\lambda_{x,i} + \varphi_{y,i}\cdot\lambda_{y,i}\right) \to 0$.

Обозначая неопределенные множители $\lambda_{x,i} = -2\cdot k_{x,i}$ и $\lambda_{y,i} = -2\cdot k_{y,i}$, где $k_{x,i}$, $k_{y,i}$ – коррелаты и учитывая (7), перепишем функцию Лагранжа следующим образом:

$$
\begin{gathered}
F(....) = -2\cdot\sum_{i=1}^{L}k_{x,i}\cdot\left(w_{x,i} + a^x_{d_{1,i}}\cdot\upsilon_{d_{1,i}} + a^x_{d_{2,i}}\cdot\upsilon_{d_{2,i}} + a^x_{b_{1,i}}\cdot(\upsilon_{b_{1,i}}+\upsilon_{c1}) + \right. \\
\left. + a^x_{b_{2,i}}\cdot(\upsilon_{b_{2,i}}+\upsilon_{c1}) - \upsilon_x\right) - 2\cdot\sum_{i=1}^{L}k_{y,i}\cdot\left(w_{y,i} + a^y_{d_{1,i}}\cdot\upsilon_{d_{1,i}} + \right. \\
\left. + a^y_{d_{2,i}}\cdot\upsilon_{d_{2,i}} + a^y_{b_{1,i}}\cdot(\upsilon_{b_{1,i}}+\upsilon_{c1}) + a^y_{b_{2,i}}\cdot(\upsilon_{b_{2,i}}+\upsilon_{c2}) - \upsilon_y\right) + \\
+ \sum_{i=1}^{L}\left(\frac{\upsilon^2_{d_{1,i}}}{\sigma^2_{d_{1,i}}} + \frac{\upsilon^2_{d_{2,i}}}{\sigma^2_{d_{2,i}}} + \frac{\upsilon^2_{b_{1,i}}}{\sigma^2_{b_{1,i}}} + \frac{\upsilon^2_{b_{2,i}}}{\sigma^2_{b_{2,i}}}\right) + \frac{\upsilon_x^2}{\sigma_x^2} + \frac{\upsilon_y^2}{\sigma_y^2} + \frac{\upsilon_{c1}^2}{\sigma_{c1}^2} + \frac{\upsilon_{c2}^2}{\sigma_{c2}^2}
\end{gathered}. \tag{9}
$$

Искомые значения поправок должны удовлетворять равенствам нулю всех частных производных функции Лагранжа по каждой из переменных $\upsilon_{d_{n,i}}$, $\upsilon_{b_{n,i}}$, υ_{c1}, υ_{c2}, υ_x и υ_y. Дифференцируя, приравнивая к нулю и перенося поправки в правые части, получим систему:

$$\begin{cases} \begin{cases} \upsilon_{d_{1,i}} = \sigma^2_{d_{1,i}} \cdot k_{x,i} \cdot a^x_{d_{1,i}} + \sigma^2_{d_{1,i}} \cdot k_{y,i} \cdot a^y_{d_{1,i}} \\ \upsilon_{d_{2,i}} = \sigma^2_{d_{2,i}} \cdot k_{x,i} \cdot a^x_{d_{2,i}} + \sigma^2_{d_{2,i}} \cdot k_{y,i} \cdot a^y_{d_{2,i}} \\ \upsilon_{b_{1,i}} = \sigma^2_{b_{1,i}} \cdot k_{x,i} \cdot a^x_{b_{1,i}} + \sigma^2_{b_{1,i}} \cdot k_{y,i} \cdot a^y_{b_{1,i}} \\ \upsilon_{b_{2,i}} = \sigma^2_{b_{2,i}} \cdot k_{x,i} \cdot a^x_{b_{2,i}} + \sigma^2_{b_{2,i}} \cdot k_{y,i} \cdot a^y_{b_{2,i}} \end{cases} \\ \upsilon_x = -\sigma^2_x \cdot \sum_{i=1}^{L} k_{x,i} \\ \upsilon_y = -\sigma^2_y \cdot \sum_{i=1}^{L} k_{y,i} \\ \upsilon_{c1} = \sigma^2_{c1} \cdot \sum_{i=1}^{L} \left(k_{x,i} \cdot a^x_{b_{1,i}} + k_{y,i} \cdot a^y_{b_{1,i}} \right) \\ \upsilon_{c2} = \sigma^2_{c2} \cdot \sum_{i=1}^{L} \left(k_{x,i} \cdot a^x_{b_{2,i}} + k_{y,i} \cdot a^y_{b_{2,i}} \right) \end{cases} . \tag{10}$$

Для определения коррелат $k_{x,i}$ и $k_{y,i}$ умножим каждую восьмерку уравнений (10) на соответствующие коэффициенты $a^x_{d_{1,i}}$, $a^x_{d_{2,i}}$, $a^x_{b_{1,i}}$, $a^x_{b_{2,i}}$, $a^x_{x,i}$, $a^x_{y,i}$, $a^x_{b_{1,i}}$, $a^x_{b_{2,i}}$ и сложим, получая в правых частях, в соответствии с (7), минус $w_{x,i}$, а также умножим каждую восьмерку уравнений (10) на соответствующие коэффициенты $a^y_{d_{1,i}}$, $a^y_{d_{2,i}}$, $a^y_{b_{1,i}}$, $a^y_{b_{2,i}}$, $a^y_{x,i}$, $a^y_{y,i}$, $a^y_{b_{1,i}}$, $a^y_{b_{2,i}}$ и сложим, получая в правых частях минус $w_{y,i}$. Таким образом, формируется система из $2 \cdot L$ линейных уравнений, которая после группировки принимает вид:

$$\begin{cases} -w_{x,i} = \sum_{j=1}^{L} k_{x,j} \cdot M^{xx}_{i,j} + \sum_{j=1}^{L} k_{y,j} \cdot M^{xy}_{i,j} \\ -w_{y,i} = \sum_{j=1}^{L} k_{x,j} \cdot M^{yx}_{i,j} + \sum_{j=1}^{L} k_{y,j} \cdot M^{yy}_{i,j} \end{cases} , \tag{11}$$

где $$M^{xx}_{i,j} = \begin{cases} \sigma^2_x + a^x_{b_{1,i}} \cdot \sigma^2_{c1} \cdot a^x_{b_{1,j}} + a^x_{b_{2,i}} \cdot \sigma^2_{c2} \cdot a^x_{b_{2,j}}, & i \neq j \\ \sigma^2_x + {a^x_{b_{1,i}}}^2 \cdot \sigma^2_{c1} + {a^x_{b_{2,i}}}^2 \cdot \sigma^2_{c2} + {a^x_{d_{1,i}}}^2 \cdot \sigma^2_{d_{1,i}} + \\ + {a^x_{d_{2,i}}}^2 \cdot \sigma^2_{d_{2,i}} + {a^x_{b_{1,i}}}^2 \cdot \sigma^2_{b_{1,i}} + {a^x_{b_{2,i}}}^2 \cdot \sigma^2_{b_{2,i}} & i = j \end{cases};$$

$$M^{xy}_{i,j} = \begin{cases} a^x_{b_{1,i}} \cdot \sigma^2_{c1} \cdot a^y_{b_{1,j}} + a^x_{b_{2,i}} \cdot \sigma^2_{c2} \cdot a^y_{b_{2,j}}, & i \neq j \\ a^x_{b_{1,i}} \cdot \sigma^2_{c1} \cdot a^y_{b_{1,i}} + a^x_{d_{1,i}} \cdot \sigma^2_{d_{1,i}} \cdot a^y_{d_{1,i}} + a^x_{d_{2,i}} \cdot \sigma^2_{d_{2,i}} \cdot a^y_{d_{2,i}} + \\ + a^x_{b_{1,i}} \cdot \sigma^2_{b_{1,i}} \cdot a^y_{b_{1,i}} + a^x_{b_{2,i}} \cdot \sigma^2_{c2} \cdot a^y_{b_{2,i}} + a^x_{b_{2,i}} \cdot \sigma^2_{b_{2,i}} \cdot a^y_{b_{2,i}} & i = j \end{cases};$$

$$M^{yy}_{i,j} = \begin{cases} \sigma^2_y + a^y_{b_{1,i}} \cdot \sigma^2_{c1} \cdot a^y_{b_{1,j}} + a^y_{b_{2,i}} \cdot \sigma^2_{c2} \cdot a^y_{b_{2,j}}, & i \neq j \\ \sigma^2_y + {a^y_{b_{1,i}}}^2 \cdot \sigma^2_{c1} + {a^y_{b_{2,i}}}^2 \cdot \sigma^2_{c2} + {a^y_{d_{1,i}}}^2 \cdot \sigma^2_{d_{1,i}} + \\ + {a^y_{d_{2,i}}}^2 \cdot \sigma^2_{d_{2,i}} + {a^y_{b_{1,i}}}^2 \cdot \sigma^2_{b_{1,i}} + {a^y_{b_{2,i}}}^2 \cdot \sigma^2_{b_{2,i}} & i = j \end{cases};$$

$$M_{i,j}^{yx}=\begin{cases} a_{b_{1,i}}^{y}\cdot\sigma_{c1}^{2}\cdot a_{b_{1,j}}^{x}+a_{b_{2,i}}^{y}\cdot\sigma_{c2}^{2}\cdot a_{b_{2,j}}^{x}, & i\neq j\\ a_{b_{1,i}}^{y}\cdot\sigma_{c1}^{2}\cdot a_{b_{1,i}}^{x}+a_{d_{1,i}}^{y}\cdot\sigma_{d_{1,i}}^{2}\cdot a_{d_{1,i}}^{x}+a_{d_{2,i}}^{y}\cdot\sigma_{d_{2,i}}^{2}\cdot a_{d_{2,i}}^{x}+ & \\ +a_{b_{1,i}}^{y}\cdot\sigma_{b_{1,i}}^{2}\cdot a_{b_{1,i}}^{x}+a_{b_{2,i}}^{y}\cdot\sigma_{c2}^{2}\cdot a_{b_{2,i}}^{x}+a_{b_{2,i}}^{y}\cdot\sigma_{b_{2,i}}^{2}\cdot a_{b_{2,i}}^{x} & i=j \end{cases}.$$

Система (11) содержит $2\cdot L$ линейных уравнений с $2\cdot L$ неизвестными. Ее решение может быть получено любым из известных способов, например, методом Гаусса [1]. После нахождения коррелат $k_{x,i}$ и $k_{y,i}$ их подстановкой в пятое и шестое уравнения системы (10) определяются поправки по относительному местоположению (υ_x, υ_y), а подстановкой в седьмое и восьмое уравнения – по ориентации систем координат носителей (υ_{c1}, υ_{c2}).

Сложность полученного алгоритма определяется сложностью решения системы линейных уравнений (11) и при применении для этого метода Гаусса является кубической.

Результаты экспериментального исследования

Проверка адекватности предложенного алгоритма определения поправок по ОМОК носителей осуществлялась посредством математического моделирования. При этом использовались следующие значения СКП: $\sigma_{d_{1,i}}=\sigma_{d_{2,i}}=100$ м, $\sigma_{b_{1,i}}=\sigma_{b_{2,i}}=0{,}5$ град, $\sigma_{c1}=\sigma_{c2}=1{,}0$ град, $\sigma_x=\sigma_y=1500$ м. В каждом эксперименте L целей случайным образом распределялись по площади квадрата с длиной стороны 30000 м и центром в точке своего объекта. Местоположение другого носителя также случайно выбиралось в пределах этого квадрата.

В результате моделирования установлено, что при указанных условиях значительное повышение точности по ОМОК носителей происходит при одновременном сопровождении 4..7 целей ИИ обоих носителей. В этом случае СКП определения относительного местоположения носителей уменьшается до величины 0,17..0,03 от своего значения без применения рассмотренного алгоритма, а СКП по относительной ориентации – до величины 0,17..0,08.

Дальнейшее увеличение количества одновременно сопровождаемых ИИ обоих носителей целей приводит к еще большему повышению точности определения ОМОК носителей, однако, относительный прирост точности от каждой цели по мере увеличения их числа оказывается менее существенным.

Заключение

Предложенный в настоящей работе алгоритм позволяет найти поправки по относительному местоположению и ориентации систем координат носителей. Использование этих поправок при пересчете координат целей от ИИ другого носителя в систему координат своего объекта обеспечивает существенное повышение точности получаемых координатных данных. Полиномиальное время работы рассмотренного алгоритма обосновывает возможность решения данной задачи в реальном времени. Эти обстоятельства позволяют сделать вывод о целесообразности использования предложенного алгоритма определения поправок по ОМОК в реальных системах.

Предложенный алгоритм вырабатывает поправки по ОМОК только в горизонтальной плоскости, однако, представляется возможным обобщение рассмотренного подхода на трехмерный случай.

Список литературы

1. Гантмахер Ф. Р. Теория матриц. – М.: Наука, 1967. – 576 с.

2. Гапионок А. В., Катенин В. А., Катенин А. В., Меркушов Н. С. Опыт боевого использования спутниковых навигационных систем второго поколения в современных войнах // Морская радиоэлектроника. – 2004. – №1 (7). – С. 26-37.

3. Макшанов А. В. Математический практикум. Конечномерный линейный анализ и некоторые его приложения. – СПб.: ВМА, 2007. – 80 с.

4. Маркин Н. С. Основы теории обработки результатов измерений: учебное пособие для средних специальных учебных заведений. – М.: Издательство стандартов, 1991. – 176 с.

5. Савченко Д. И. Задача отождествления данных в системах освещения обстановки // Итоги диссертационных исследований. Т. 3. Материалы III Всероссийского конкурса молодых ученых. – М.: РАН, 2011. – С. 149-159.

6. Савченко Д. И. Эвристические алгоритмы для второго этапа отождествления информации // Состояние, проблемы и перспективы создания корабельных информационно-управляющих комплексов: сборник докладов научно-технической конференции. – М.: Концерн «Моринформсистема-Агат», 2011. – С. 42-47.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России по ГК от 11.10.2011 г. № 07.514.12.4023 в рамках ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007–2013 г.».

Рецензенты:

Сикарев Игорь Александрович, доктор технических наук, доцент, профессор каф. «Комплексного обеспечения информационной безопасности», Санкт-Петербургский государственный университет водных коммуникаций, г. Санкт-Петербург.

Мальцев Олег Григорьевич, доктор технических наук, начальник научно-исследовательской лаборатории научно-производственного комплекса радиотехнических систем, ФНПЦ ОАО Концерн «Гранит-Электрон», г. Санкт-Петербург.