

УДК 004.932.75:519.76

Васюхін М.І., д-р техн. наук  
 Гулевець В.Д., канд. техн. наук  
 Бойко О.Л.

## МЕТОДИ ПРИСВОЄННЯ КООРДИНАТ, ВИЗНАЧЕННЯ ОРІЄНТАЦІЇ ТА ВІЗУАЛІЗАЦІЇ РУХОМИХ ОБ'ЄКТІВ НА КАРТОГРАФІЧНОМУ ФОНІ У РЕАЛЬНОМУ ЧАСІ

Національний авіаційний університет

*Запропоновано методи визначення місцезнаходження, присвоєння координат, визначення орієнтації і візуалізації на екрані систем відображення символів динамічних об'єктів, що рухаються в навколосемному просторі*

### Постановка проблеми

Найбільш важкою задачею відображення рухомих об'єктів на картографічному фоні у реальному часі є представлення повітряної обстановки [1-8]. Однією із складових цієї задачі є визначення та присвоєння координат символам об'єктів, що швидко рухаються в навколосемному просторі. Враховуючи збільшення кількості та швидкості таких об'єктів, що мають тенденцію зростання, дана задача є дуже актуальною.

### Аналіз останніх досліджень і публікацій

Відомі методи і засоби представлення повітряної обстановки [1-4] відрізняються тим, що на існуючих екранах, наприклад, диспетчерської служби аеропорту, така обстановка представляється у вигляді міток трубок кругової розгортки, при цьому вона не відображається символами, що рухаються, на кольоровому картографічному фоні в реальному часі.

### Задачі досліджень

До задач, що вирішуються в реальному часі, слід віднести:

1. Виявлення об'єкту і присвоєння початкової координати символу об'єкту, виведеного на картографічний фон з орієнтацією відповідно до курсу об'єкту.

2. Супровід об'єкту: присвоєння поточних координат і виведення покрокового зображення символу на екран відповідно до курсу в реальному часі.

3. Генерація кадру та візуалізація його відображення з частотою не менше 50 кадрів в секунду.

Вирішення першої задачі щодо визначення місцеположення об'єктів, що рухаються в навколосемному просторі, можливо за допомогою радіолокаційної станції (РЛС) і глобальної системи позиціонування (*GPS*). Існують декілька типів РЛС, які різняться між собою параметрами, які беруться при визначенні місцезнаходження рухомих об'єктів. Одні типи РЛС визначають:  $\gamma$  – кут місця,  $\beta$  – азимут і  $D$  – дальність. Інші типи РЛС визначають:  $\gamma$ ,  $\beta$  і  $H$  – висоту об'єкту (яку завжди можна перерахувати в дальність). Ще існують РЛС, які визначають азимут і дальність до рухомого об'єкту, рис. 1.

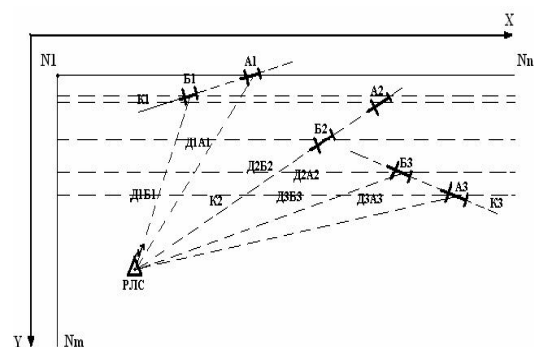


Рис. 1. Приклад відображення місцеположення рухомих об'єктів та їх курсу за допомогою РЛС

Глобальні супутникові навігаційні системи (*GPS*) дають значення географічних координат об'єкту – широту і довготу, а також величину висоти. Системи за

їм принципом дії є середньоорбітальними далекомірними доплерівськими системами пасивного типу. Пасивний спосіб організації системи, коли користувачі не посилають сигналів на супутники, що спостерігаються, дозволяє обслуговувати необмежену кількість споживачів навігаційної системи. Навігаційні визначення в такій системі (розрахунок координат) відбуваються передусім на основі вимірювань дальностей до супутників. Крім того, структура сигналів супутників дозволяє отримувати радіальні швидкості за вимірами доплерівських зсувів несучих частот.

Випромінений  $i$ -м супутником системи *GPS* сигнал містить індивідуальний (властивий тільки даному супутнику) далекомірний код, який дозволяє однозначно визначити часовий інтервал  $\tau_i$  між моментом випромінення сигналу супутниковим годинником і моментом прийому сигналу антеною споживача за годинником приймача. В системі ГЛОНАСС розподіл сигналів супутників частотне, а не кодове, як в *GPS*, тому випромінення сигналів супутники ГЛОНАСС ведуть кожний на своїй частоті (відмінно від фіксованої частоти в системі *GPS*). В зв'язку з цим, система займає цілий діапазон частот 1602, 5625 – 1616, 5000 МГц і 1246,

4375 – 1256, 9375 МГц. Вона є більш захищена від завад (створити зашумлення в діапазоні частот складніше, ніж на одній фіксованій частоті). Часові шкали всіх супутників синхронізуються шляхом використання прецизійних атомних бортових еталонів частоти (бортових годинників) і періодичних корекцій їх показників, що проводяться з Землі станціями закладки службової інформації. Таким чином, вимірний часовий інтервал  $\tau_i$  складається з часу, який витрачається на проходження простору між супутником і споживачем  $\tau_{ri}$  та зсуву часової шкали приймача відносно часової системи шкали (загальної часової шкали всіх супутників)  $\Delta\tau$ :

$$\tau_i = \tau_{ri} + \Delta .$$

За цим часовим інтервалом розраховується вимірювана дальність  $r_{mi}$ , яка називається псевдодальністю:

$$r_{mi} = c\tau_i,$$

де  $c$  – швидкість розповсюдження електромагнітних хвиль.

Псевдодальність визначається координатами супутника та користувача, похибками годинника користувача та іншими похибками вимірів:

$$r_{mi} = \sqrt{(x_{si} - x)^2 + (y_{si} - y)^2 + (z_{si} - z)^2} + c\Delta\tau + \varepsilon_i,$$

де  $r_i = \sqrt{(x_{si} - x)^2 + (y_{si} - y)^2 + (z_{si} - z)^2}$  – точне значення дальності до супутника;  $x_{si}, y_{si}, z_{si}$  та  $x, y, z$  – координати супутника та користувача відповідно,  $\Delta\tau$  – зсув часової шкали приймача відносно системної шкали часу (похибка годинника користувача);  $\varepsilon_i$  – похибки виміру дальності, що виникають із-за похибок координат (ефемерид)  $i$ -го супутника, впливом умов розповсюдження сигналу та іншими причинами.

В основі визначення координат користувача лежить спільне сумісне рішення декількох рівнянь для псевдодальнос-

тей. При цьому визначаються координати користувачів  $x, y, z$  та зсув часової шкали приймача  $\Delta\tau$ . Наявність чотирьох невідомих визначає необхідність використання сигналів по меншій мірі чотирьох супутників і, відповідно, рішення не менше чотирьох рівнянь для псевдо дальності. Велика кількість вимірів ( $i > 4$ ) може бути використана для знаходження середнього значення похибок вимірів  $\varepsilon_i$ .

Для вирішення системи з декількох рівнянь для псевдодальності необхідні координати супутників  $x_{si}, y_{si}, z_{si}$ . Ці координати розраховують для кожного необхідного моменту часу, використовуючи так звані ефемериди супутника,

розраховані командно-вимірювальним комплексом і передані на борт супутника для зберігання та передачі в складі навігаційного сигналу дані про координати супутника на фіксовані моменти часу.

Вимірювання доплерівських зсувів

$$\Delta f_{mi} = \frac{1}{r_i} [(x_{si} - x)(v_x - v_{xi}) + (y_{si} - y)(v_y - v_{yi}) + (z_{si} - z)(v_z - v_{zi})] + \Delta f_{mi} + \Delta f_{mi}$$

де  $\Delta f_{mi}$  – похибка визначення радіальної швидкості, обумовлена зсувом частоти опорного генератора приймача  $\Delta f_{mi}$ ,  $\Delta f_{mi}$  – інші похибки вимірів швидкості.

В свою чергу, радіальна швидкість  $v_{ri}$  і похибка її визначення  $\Delta v_{ri}$  однозначно визначаються виміряним доплерівським зсувом частоти несучої  $\Delta f_{mi}$  та зсувом частоти опорного генератора  $\Delta f_{mi}$ :

$$v_{ri} = \Delta f_{mi} \lambda_n, \quad \Delta v_{ri} = \Delta f_{mi} \lambda_n,$$

де  $\lambda_n$  – номінальне значення довжини хвилі несучої.

Таким чином визначаються три похідні координати  $\dot{x}, \dot{y}, \dot{z}$ , які використовуються для розрахунку необхідних проєкцій швидкості і зсув частоти опорного генератора приймача  $\Delta f_{mi}$ . При цих розрахунках координати  $x, y, z$  вже визначені шляхом вирішення системи рівнянь для псевдодальностей.

Сукупність восьми рівнянь дозволяє визначити вісім параметрів: три координати, три проєкції швидкості і дві поправки до даних приймача – зсув часової шкали приймача  $\Delta t$  та зсув частоти опорного генератора  $\Delta f_{mi}$ .

Рівняння для визначення восьми перерахованих вище параметрів записані в декартовій системі координат і визначають лінійні координати  $x, y, z$ . На практиці в приймачі GPS перерахунок до географічних координат в системі WGS-84 – широті  $\varphi$ , довжині  $\lambda$ , висоті  $h$  та проєкціям відносних швидкостей об'єкту на географічні вісі – північну –  $V_N$ , східну –  $V_E$  та вертикальну –  $V_H$ . Користувачам необхідно пам'ятати, що координати в системі WGS-84 і в системі Красовського можуть різнитися на 100-150 метрів. Така похиб-

частоти несучої дозволяє визначати радіальні складові швидкості супутників відносно користувача (швидкість відносного руху вздовж лінії, що їх з'єднує). Швидкість зміни псевдо дальності може бути описана рівнянням:

ка не обмежує використання приймачів GPS на маршрутах, але не допустима при виконанні руху та посадок з застосуванням супутникових систем. Можна суттєво знизити ці похибки шляхом перерахунку координат. Формули перерахунку з однієї системи в іншу реалізовані в більшості приймачів, де закладена можливість вибору параметрів еліпсоїду користувачем. Існуючі геодезичні дані дозволяють перераховувати координати між системами WGS-84 та Красовського з точністю до 1 метру.

Важливим питанням при виборі навігаційних параметрів є вибір робочого сузір'я супутників. В колі обзору приймача може знаходитись до дванадцяти супутників (зазвичай не менше шести - восьми). Для визначення повного вектору даних достатньо всього чотирьох штучних супутників Землі. Вибір сузір'я для проведення вимірів і наступного визначення навігаційних параметрів користувачів відбувається спеціальним алгоритмом, який враховує взаємне розташування всіх видимих супутників і приймача, від якого залежать похибки визначення координат і швидкостей.

Розглянемо приклад: кожному рівнянню для псевдодальності в просторі можна співвіднести сферу рівних дальностей радіусу  $r_{mi}$  з центром в точці знаходження супутникової випромінюючої антени. Приймач, що вимірює дальність  $r_{mi}$ , повинен одночасно лежати на кожній із таких сфер. При відсутності похибок достатньо трьох вимірів: дві сфери, перетинаючись, утворюють коло, а третя сфера, перетинається з нею в двох точках, одна з котрих відповідає дійсному місцеположенню (друга точка є хибним рішенням,

неоднозначність виключається в різних конкретних приймачах спеціальними алгоритмічними засобами або введенням зовнішньо додаткової інформації про приблизні координати). Таким чином при точних вимірах точка перетину трьох сфер рівних дальностей є рішенням навігаційної задачі користувача і саме в ній розміщується приймач. При наявності похибок вимірювань радіуси сфер відомі з точністю до похибки  $\Delta r_i$  та перетину сфер тепер відповідає не точка, а деяка просторова область. Розміри цієї області залежать як від помилок вимірювання дальностей  $\Delta r_i$ , так і від взаємного розташування сфер, і цими розмірами похибки розрахунку координат. Ця особливість супутникових навігаційних систем залежності похибок місцезнаходження від геометричних властивостей системи „супутник - приймач” представлена на рис. 2.

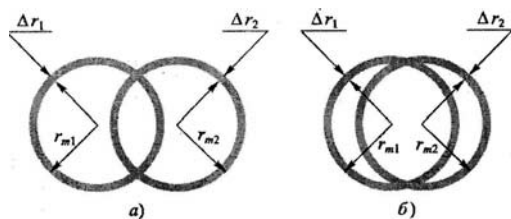


Рис. 2. Залежність точності місцевизначення від геометрії системи „супутник – приймач”

На рис. 2 (а) розташування супутників сприятливе і область похибок місцезнаходження суттєво менше, ніж на рис. 2 (б), де розташування супутників незадовільне. Відомо, що оптимальним є сузір'я з чотирьох супутників, які створюють тетраедр: три супутники розташовані біля горизонту в вершинах правильного трикутника, а четвертий – в zenіті. Геометрія сузір'я, близького до оптимального, показана на рис. 3. при зближенні супутників геометричні властивості системи погіршуються. В граничному випадку, коли два супутники розташовуються на одній лінії візування, перетин сфер відсутній, а система рівнянь для псевдодальностей не має рішення.

Для кількісної характеристики оптимальності робочого сузір'я супутників

вводиться поняття геометричного фактора, який є основним критерієм при виборі сузір'я супутників. Розмір геометричного фактору зворотно пропорційний об'єму тетраедру, побудованого на четвірці вибраних супутників. Більшість приймачів має режим індикації геометричного фактору для поточного робочого сузір'я. Зазвичай вибирають такі сузір'я, для яких значення геометричного фактору лежать в діапазоні від 1 до 4 при більших значеннях геометричного фактору похибки місцезнаходження стають занадто великими.

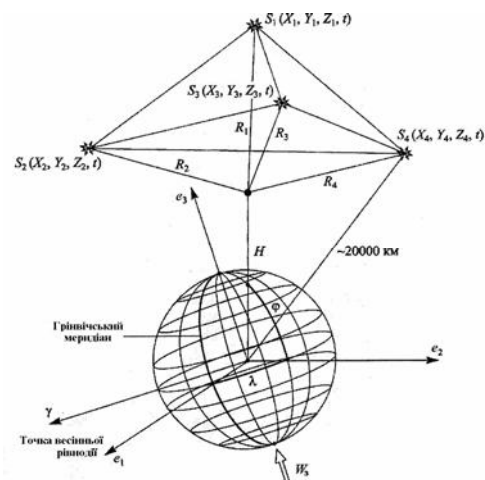


Рис. 3. Схема раціонального вибору сузір'я супутників

Більшість сучасних багатоканальних приймачів слідкує більше ніж за чотирма супутниками. В основному кількість відслідковуваних супутників від 6 до 12 або спостереження ведеться за всіма видами супутниками. З числа відслідковуваних супутників на основі аналізу геометричного фактору вибирається найкраще робоче сузір'я. Надлишкові супутники використовуються для контролю цілісності системи і являються резервними: вони використовуються, якщо сигнал від якогось-небудь з супутників робочого сузір'я пропадає (зникнення супутника за горизонт, перекриття лінії візування перешкодою і т. д.).

Питання вибору структури і складу навігаційного сигналу є одним з важливих, так як його тип в значній мірі визначає властивості всієї системи. Сигнали супутникової системи мають :

- задану точність навігаційних визначень;
- задану вірогідність декодування службової інформації;
- потужність випромінювання передавача супутника при обмеженій ширині полоси випромінювання;
- розмежування сигналів від різних штучних супутників Землі;
- стійкість до перешкод багатопроменевості та організованим перешкодам;
- обмеженість апаратних витрат на приймачі користувачів;
- можливість розвитку і модернізації системи.

З ціллю забезпечення цих вимог використовують сигнал шумоподібної структури, так званий псевдо шумовий сигнал. При цьому, високочастотна несуча підвернена фазовій маніпуляції навігаційним кодом, який в свою чергу є сумою дальномірного коду і коду двоїчної службової інформації, рис. 4.

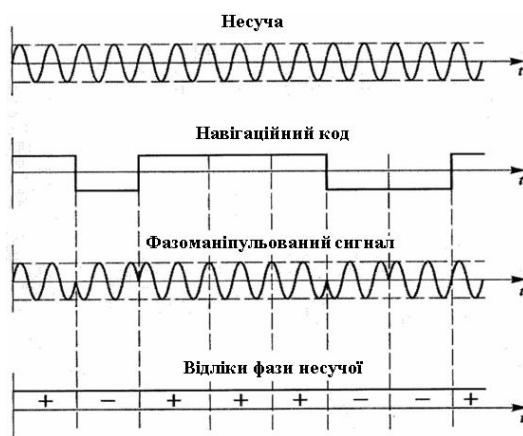


Рис. 4. Приклад фазоманіпульованого сигналу

Для забезпечення прискорення присвоєння координат при переміщенні складних символів об'єктів на картографічному фоні на екрані системи відображення повітряної обстановки нами пропонується метод визначення місцезнаходження та присвоєння координат, суть якого полягає в тому, що кожному напрям заздалегідь нумерується і кожному такому номеру в полі оперативної пам'яті, призначеному для зберігання зображень набору символів,

відповідає певний масив з групи масивів зображень символу, відповідних певним напрямкам руху.

У разі такої організації переміщення символу, при його переміщенні від точки А до точки Б, а потім в новому напрямку від точки Б до В, спочатку привласнюються номери напрямкам. Наприклад, напрямку від А до Б привласнюється № 1, а від Б до В – № 2 і т.д. Робота програми, що забезпечує переміщення символу по траєкторії, полягає в наступному. Спочатку, згідно напрямку № 1, в точку А буде здійснена індикація зображення символу у відповідному напрямі, потім буде реалізовано його покрокове переміщення у напрямі до крапки Б. Далі в крапку Б видається зображення символу, яке відповідає напрямку № 2 і аналогічно здійснюється його переміщення в точку В. Потім в крапку В здійснюється виведення зображення символу в напрямі, відповідному наступному відрізку шляху і т.д.

Орієнтація символу на екрані вимагає задавати одночасно, як мінімум, два параметри, що характеризують майбутнє переміщення:

- координати початку руху і азимута;
- координати кінця руху.

В першому випадку азимут служить параметром, по якому необхідно організувати плавний поворот символу. Проте значення азимута не завжди є у складі даних про об'єкт.

В цьому випадку при рішенні задачі визначення орієнтації символу за наявності координат початку і кінця його руху, потрібні дані для визначення напрямку, в якому повинно бути зорієнтовано зображення символу. Розрахунок такого напрямку не складений, але вимагає часу, а внаслідок властивостей тригонометричної функції  $tg/ctg$ , неспівпадіння величин азимута і кутів в декартовій системі координат, потрібна переадресація точок, що виводяться на екран растрових дисплеїв, що і визначило наступну розробку засобів і методів, направлених на ліквідацію цих тимчасових

Спочатку проведемо зіставлення і аналіз математичних виразів, що описують співвідношення азимута  $\alpha$  і дирекційних кутів  $\delta$  в декартових координатах. Вважатимемо, що за кут, який характеризує напрям руху, прийнята величина кута  $\delta$  між позитивним напрямом осі  $X$  і фактичним напрямом руху (відлік проти годинникової стрілки, рис. 5).

Зображення на екрані дисплея розташовується в  $IV$  квадранті декартових координат (відлік по осі  $Y$  позитивний). Ця обставина вимагає внесення відповідних поправок в розрахункові формули. На., рис.6  $M1$  позначає адресу точки початку, а  $N2$  – кінця руху, а всі точки екрану адресуються підряд, починаючи з лівого верхнього кута екрану

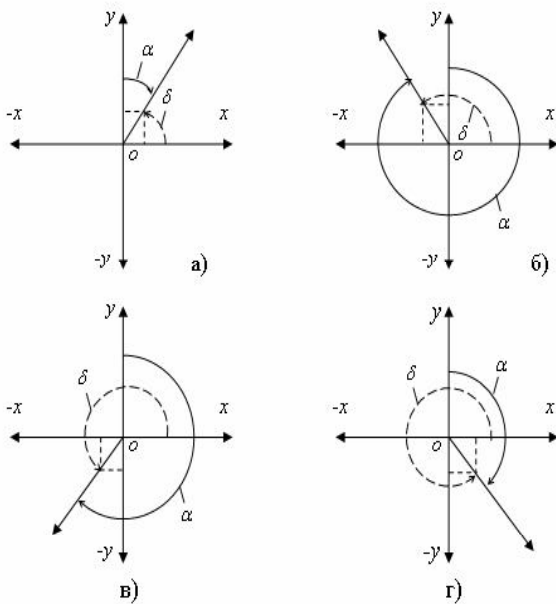


Рис. 5. Графічне представлення різних співвідношень азимуту  $\alpha$  і дирекційного кута  $\delta$  в декартових координатах

Кут між позитивним напрямом осі  $x$  (відлік проти годинникової стрілки) і напрямом руху символу визначимо за формулою

$$\begin{aligned} \delta &= \arctg((y_2 - y_1)/(x_2 - x_1)) = \\ &= \arctg(y/\Delta x) = \arctg(\operatorname{tg} \delta). \end{aligned} \quad (1)$$

Проте, внаслідок періодичності тригонометричних функцій (від 0 до  $\pi$  раді-

ан) величина цього кута дійсна тільки для 1 і 2 квадрантів.

В більшості прикладних задач в якості характеристики напрямку використовують азимут. Його величина визначається за годинниковою стрілкою від напрямку на північ, тоді як величина дирекційних кутів для тригонометричних функцій береться проти годинникової стрілки від позитивного напрямку осі  $X$  (для картографічної інформації цей напрям на захід). Залежність азимуту  $\alpha$  від дирекційного кута  $\delta$  визначена таким чином:

$$\alpha = \arctg(\operatorname{tg}(\delta - 90^\circ)). \quad (2)$$

Після перетворення одержуємо:

$$\operatorname{tg} \alpha = -\operatorname{ctg} \delta \quad (3)$$

і відповідно:

$$\operatorname{tg} \delta = -\operatorname{ctg} \alpha. \quad (4)$$

Таким чином, формули 2 - 4 ілюструють тригонометричну залежність величин азимуту від дирекційного кута.

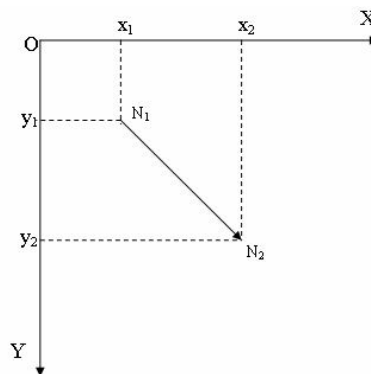


Рис. 6. Графічне відображення накладання екрану дисплею і  $IV$  квадранта декартових координат

Вибравши 16 положень символу для визначення його орієнтації, і, вважаючи, що напрям руху символу об'єкту може відповідати одному з 16 напрямів, рис.7, можна з невеликою похибкою допустити, що, якщо величина азимуту потрапляє в сегмент, обмежений промінням  $\pm 11,25^\circ$  за годинниковою стрілкою і проти від одного з вибраних основних напрямів, то зображення символу орієнтується по цьому вибраному напрямку [5, 6]. Оскільки людина практично не розрізняє напрям -

хилу менше  $11,5^{\circ}$  [7, 8], то всі напрями руху, що потрапляють в такий сегмент (кут основного напрямку в межах  $\pm 11,5^{\circ}$ ), вважаємо відповідним основному напрямку.

Для остаточного визначення номера напрямку необхідно скористатися знаком для значень  $\Delta N$ ,  $\Delta y$ ,  $\Delta x$ :

$$\Delta N = N2 - N1, \Delta y = y2 - y1, \Delta x = x2 - x1.$$

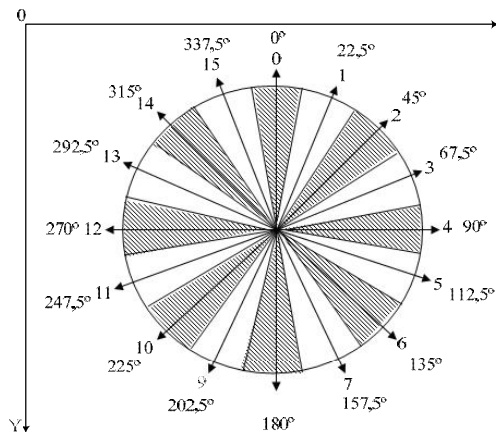


Рис. 7. Графічне відображення зон орієнтації за вибраними азимутальними напрямками

### Висновки

Запропоновані нами методи визначення місцезнаходження, присвоєння координат, орієнтації і візуалізації символів динамічних об'єктів, що рухаються в навколосемному просторі дозволяє прискорити процес присвоєння координат при переміщенні складних символів об'єктів на картографічному фоні в системі відображення повітряної обстановки, що, в свою чергу забезпечує представлення динамічних сцен на картографічному фоні у реальному часі.

### Список літератури

1. Гилой В. Интерактивная машинна графіка: Структури даних, алгоритми, мови. Пер. з англ. – М.: Мир, 1981. – 384 с.
2. Фолі Дж., вэн Дем А.. Основи інтерактивної машинної графіки: В 2-х книгах. Пер. з англ. – М.: Мир, 1985. – Кн. I – 368 с., Кн. II – 368 с.
3. Роджерс Д. Алгоритмічні основи

машинної графіки: Пер. з англ. – М.: Мир, 1989. – 512 с.

4. Павлідіс Т. Алгоритми машинної графіки і обробки зображень: Пер. з англ. – М.: Радіо і зв'язок, 1986. – 400 с.

5. Быков А.В., Селиджанов Р.М., Штробель В.А. Про розробку концепції комплексного тренажера диспетчера ОДУ // Тез. докл. Всесоюзної науково-технічної конференції «Інтеграція АСУТП і тренажерних пристроїв». – М., 1991. – С. 122–124.

6. Вєнда В.Ф. Відеотермінали в інформаційній взаємодії (інженерно-психологічні аспекти). – М.: Энергия, 1980. – 198 с.

7. Васюхин М.И. Алгоритмические и программно-аппаратные методы и средства построения интерактивных геоинформационных комплексов оперативного взаимодействия // Дисс. д-ра техн. наук: 05.13.13 / Институт кибернетики НАН Украины. – К., 2002. – 407 с.

8. Смолий В.В. Методы и средства синтеза и отображения динамических объектов (для центров оперативного управления): Дис. к-та техн. наук: 05.13.13 / Институт кибернетики НАН Украины. – К., 2001. – 176 с.

9. Васюхин М.И., Катитык О.И., Касим А.М. Метод генерации движущегося символа на экране системы отображения воздушной обстановки // Сборник докладов 2-го Международного форума "Физическая ядерная безопасность – меры противодействия актам ядерного терроризма". – К.: «ЛЕКС», 2007. – С.215–218.

10. Карпінський Ю., Лященко А. Стратегія формування національної інфраструктури геопросторових даних в Україні. – К.: НДІГК, 2006. – 108 с.

11. Авиационные автоматизированные комплексы управления и моделирования: Межвузовский сборник научных трудов. – К.: КИИГА. – 212 с.

12. Кошкарєв А.В., Каракин В.П. Региональные геоинформационные системы. – М.: Наука, 1987. – 126 с.