

О. О. Білобородов, к. т. н.

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ПОХИБОК ОРІЄНТУВАННЯ НА ТОЧНІСТЬ НАВЕДЕННЯ

Окремі зразки технічних систем впливають на різні об'єкти без самоконтролю щодо точності впливу. Із погляду техніки, це означає необхідність обґрунтування вимог до точності наведення та проведення досліджень чинників впливу на точнісні характеристики систем наведення. Якщо розглядати залежність похибок наведення (за азимутом і кутом місця) від похибок орієнтування, то виявляємо їхню функціональну залежність. У такому випадку застосовувати формулу для визначення середньоквадратичного відхилення суми незалежних випадкових величин некоректно, тому постає завдання визначення впливу цього класу похибок у загальні похибки й визначення можливих шляхів їхньої мінімізації. Наведено результати дослідження впливу похибок орієнтування на точність наведення направленої системи. Для випромінювальних радіотехнічних систем похибки прив'язки й орієнтування складають близько 60% похибок наведення. У роботі показано різномірний характер впливу похибок орієнтування (як за величиною, так і за ступенем впливу) на похибки наведення. Аналітичне дослідження похибок наведення в багатомірній області аргументів представляє певні складнощі як з огляду на значний розмір аналітичних виразів, так і з причин багатомірного характеру залежностей. Представлено результати модельного експерименту визначення характеру впливу похибок орієнтування на показники похибок наведення. Визначено, що похибки наведення залежать також від напряму на ціль. У роботі було проведено дослідження похибок наведення в області значення можливих напрямів на ціль. Установлено наявність областей мінімальних і максимальних похибок наведення в області значень азимуту та кута місця, розташування зазначених областей залежить від співвідношення величин похибок орієнтування. Для застосування засобів направленої дії запропоновано використання способу завчасного раціонального орієнтування носія для зменшення похибок наведення.

Ключові слова: орієнтування, похибки наведення, функціональна залежність, модельний експеримент.

Вступ

Постановка проблеми. Окремі зразки технічних систем здійснюють вплив на різні об'єкти без самоконтролю щодо точності впливу. Прикладами таких систем можуть бути лазерні системи різного призначення або передавальні радіотехнічні системи (радіоелектронної боротьби чи інші). Мережецентричні технології часто також передбачають рознесення функцій виявлення об'єктів впливу і безпосередній вплив на них. Для таких систем важливим завданням є точне наведення на об'єкт впливу шляхом перерахунку координат об'єкта впливу, що отримують від зовнішніх засобів, у параметри наведення засобів впливу (зазвичай, це азимут і кут місця). До новітніх зразків радіотехнічних засобів висувають високі вимоги до вибірковості дії [1]. Із погляду техніки, це означає необхідність обґрунтування вимог до точності наведення та вимагає проведення досліджень чинників впливу на точнісні характеристики систем наведення.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Під час визначення положення цілі шляхом сканування точність визначення кутових координат залежить від ширини діаграми направленості [2]. Але сучасні засоби впливу розвиваються, зокрема за рахунок уведення систем безприцільного наведення [3]. Збільшення габаритів антен дозволяє збільшити дальність дії, точність, кутову розрізняльну здатність; при цьому істотно ускладнюється конструкція антен [4]. На точність наведення й супроводження суттєво впливають механічні похибки систем монтування [5]. Визначення точності наведення є функцією складного техніко-економічного компромісу [6]. Конструкція систем наведення, окрім вимог точності,

часто має забезпечувати вимоги надійності й оперативності [7]. Дослідники вивчають питання впливу точності навігаційних даних на результати роботи систем [8]. Водночас у дослідженнях недостатньо уваги приділяють універсальним методам та програмно-алгоритмічним засобам оцінювання числових характеристик погіршення показників якості застосування систем (комплексів) унаслідок похибок підсистеми визначення орієнтування.

Для радіолокаційної техніки точність визначення координат цілі характеризується переважно точністю вимірювань: шириною діаграми направленості, відношенням сигнал/завада, кількістю частотних пачок зондувальних імпульсів, похибками флуктуацій амплітуди відбитого сигналу тощо [9]. Похибки орієнтування вважають незалежними, вони складають не більше 10% загальних похибок кутових визначень. Для пасивних систем або радіотехнічних систем без зворотного зв'язку похибки механіки складають не більше 40%, а решта – це похибки прив'язки й орієнтування. За таких умов складники σ_i сумарної похибки σ_Σ вважають незалежними й середньоквадратичне відхилення сумарної похибки рахують за класичною формулою:

$$\sigma_\Sigma = \sqrt{\sigma_i^2} . \quad (1)$$

Утім, якщо розглядати залежність похибок наведення (за азимутом і кутом місця) від похибок орієнтування, то виявляється їхня функціональна залежність. У такому випадку застосовувати (1) некоректно і постає завдання визначення впливу цього класу похибок на загальні похибки й визначення можливих шляхів їх мінімізації.

Ураховуючи зазначене, *мета статті* – визначити характер впливу похибок орієнтування базового носія (платформи) на похибки наведення направленої системи.

Методи дослідження

У дослідженні було використано: метод однорідних координат – для базових геометричних перетворень оберту й зсуву; геометричні методи – для визначення тригонометричних функцій складників вектора наведення через координати цілі й бази, а також орієнтування бази; методи функціонального аналізу й лінеаризації функцій – для аналітичного визначення вигляду функції середньоквадратичного відхилення (СКВ) похибок складників вектора наведення; метод математичного моделювання й статистичного аналізу – для проведення програмного експеримента дослідження впливу похибок орієнтування на похибки наведення; метод декомпозиції – для дослідження впливу окремих параметрів на похибки наведення в багатомірному просторі аргументів впливу; метод проєкцій – для аналізу результатів дослідження похибок наведення.

Основна частина

Загалом сторонніми засобами визначають положення в просторі об'єкта впливу (координати цілі, межі району впливу тощо). Навігаційна система визначає координати й орієнтування носія засобу впливу (бази). Обчислювальна система бази за визначеними даними визначає необхідні параметри наведення (азимут θ і кут місця ϕ) і система (комплекс) наводить антенну систему у відповідному напрямку.

Визначення кутів наведення

Розглянемо порядок визначення вектора наведення (θ, ϕ) . Основною системою координат (СК) обираємо геоцентричну (гринвіцьку) прямокутну систему координат (СК0) [10]. Зразок (носій антенної системи) визначає свої координати $B^{CK0}(x_B, y_B, z_B)$, орієнтування $R^{CK0}(\alpha, \beta, \gamma)$, а також отримує координати цілі $C^{CK0}(x_C, y_C, z_C)$. Далі зразок визначає

вектор наведення, який складається з азимуту θ й кута місця ϕ . Уведемо СК, яка прив'язана до антенної системи (СК1): центр координат (т. А) – фазовий центр антени; вісь Ax' направлена вздовж електричної осі антени; вісь Ay' – у площини апертури антени перпендикулярно площині симетрії, що проходить через геометричний центр антени та через геометричний центр опромінювача; вісь Az' доповнює систему до правої.

Необхідно знайти параметри управління підсистеми наведення: такі кути повороту СК1 відносно СК0, щоб вісь Ax' була направлена на ціль. Для цього достатньо знайти координати вектора \overline{AC} (в СК1) та знайти кути θ , ϕ для суміщення осі Ax' з \overline{AC} .

Координати цілі в СК1 можна знайти через відомі координати початку СК1 в СК0 та відомого орієнтування СК1 відносно СК0. Відповідні координати визначають виразом:

$$C'(x'_C, y'_C, z'_C) = C(x_C, y_C, z_C) \cdot \|A^{C' \leftarrow C}\|, \quad (2)$$

де матриця переходу дорівнює:

$$\|A^{C' \leftarrow C}\| = \|A_{\Delta L}^{C' \leftarrow C}\| \cdot \|A_Z^{C' \leftarrow C}\|, \quad (3)$$

а складники матриці переходу (матриця зсуву $\|A_{\Delta L}^{C' \leftarrow C}\|$ та матриця оберту $\|A_Z^{C' \leftarrow C}\|$) визначають відповідно до апарату однорідних координат [11].

Подальші координати наведено в СК1. Для суміщення осі Ax' з \overline{AC} здійснимо оберт навколо осі Ay' , а потім навколо осі Az' (рис. 1). Щоб визначити кут повороту θ навколо осі Ay' (для переводу \overline{AC} у площину $Ax'y'$), спроектуємо спочатку \overline{AC} на площину $Ax'z'$. Довжина проєкції:

$$d = \sqrt{x_C^2 + z_C^2}. \quad (4)$$

Тригонометричні функції кута θ :

$$\sin \theta = -\frac{z'_C}{\sqrt{x_C'^2 + z_C'^2}}, \quad (5)$$

$$\cos \theta = \frac{x'_C}{\sqrt{x_C'^2 + z_C'^2}}, \quad (6)$$

де від'ємний знак під час визначення $\sin \theta$ зумовлений від'ємним напрямком оберту (за годинниковою стрілкою).

Після переводу в площину $Ax'y'$ за допомогою оберту навколо осі Ay' x' компонента вектора \overline{AC} дорівнюватиме d , а y' компонента дорівнює $(y_C - y_A)$. Отже, тригонометричні функції кута оберту ϕ навколо осі Az' , який необхідний для суміщення \overline{AC} з віссю Ax' , дорівнюють:

$$\sin \phi = \frac{y_C}{|\overline{AC}|} = \frac{y'_C}{\sqrt{x_C'^2 + y_C'^2 + z_C'^2}}, \quad (7)$$

$$\cos \phi = \frac{d}{|\overline{AC}|} = \frac{\sqrt{x_C'^2 + z_C'^2}}{\sqrt{x_C'^2 + y_C'^2 + z_C'^2}}. \quad (8)$$

Отже, вектор наведення визначають за допомогою (6) – (8):

$$\theta = \operatorname{arctg} \left(\frac{\sin \theta}{\cos \theta} \right), \quad \phi = \operatorname{arctg} \left(\frac{\sin \phi}{\cos \phi} \right), \quad (9)$$

де квадрант θ та ϕ визначають з урахуванням знаків синусів і косинусів відповідних кутів.

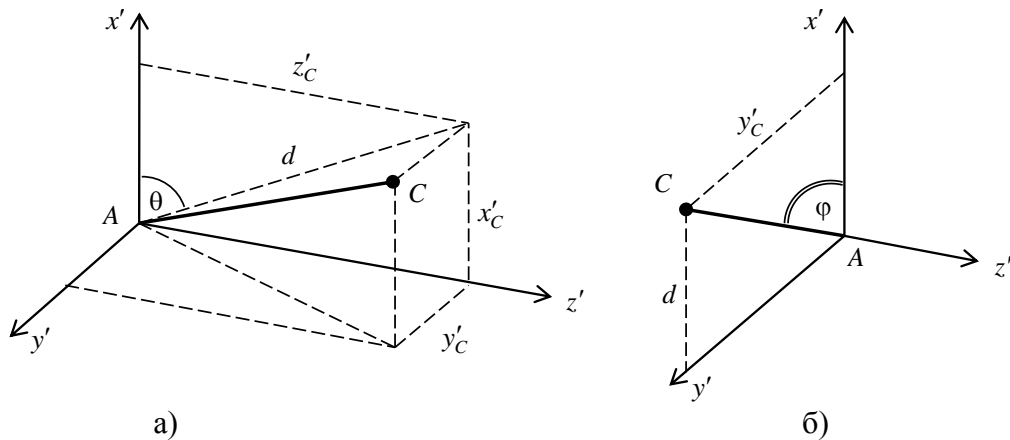


Рис. 1. Оберти для суміщення: а) початкове положення; б) після оберту навколо осі Ay'

Отже, завдання наведення полягає у визначенні відповідних кутів наведення (вектора наведення) відповідно до (9).

Координати цілі визначають зовнішнім засобом, тому похибки координат цілі не розглядають. У (9) змінні ($\tilde{x}_B, \tilde{y}_B, \tilde{z}_B, \tilde{\alpha}_R, \tilde{\beta}_R$ та $\tilde{\gamma}_R$), від яких залежать функції (θ та ϕ), мають імовірнісний характер із випадковими похибками: $\tilde{x}_B = x_B + \delta x, \tilde{y}_B = y_B + \delta y, \tilde{z}_B = z_B + \delta z; \tilde{\alpha}_R = \alpha_R + \delta \alpha, \tilde{\beta}_R = \beta_R + \delta \beta, \tilde{\gamma}_R = \gamma_R + \delta \gamma$. Унаслідок внесення похибок отримуємо результуючий вектор наведення у вигляді суміші їхніх ідеальних складників з похибками: $\tilde{\theta} = \theta + \delta \theta, \tilde{\phi} = \phi + \delta \phi$. З упевненістю можна вважати, що похибки орієнтування розподілені за центрованим нормальним законом із відомими СКВ. Для сучасної супутникової радіонавігаційної апаратури, наприклад, СКВ похибок визначення координат бази не перевищує 10 м (залежить від методу й часу визначень). СКВ похибок орієнтування сучасної апаратури складає:

- 1) багатобазові фазові супутникові навігаційні визначення – $(1,4-3,8) \cdot 10^{-3}$ рад (розмір бази – до 1,5 м) [12];
- 2) гірокомпаси – $(0,5-9) \cdot 10^{-4}$ рад;
- 3) магнітні компаси – до $9 \cdot 10^{-3}$ рад [13].

Безпосереднє визначення числових характеристик випадкових функцій (9) за числовими характеристиками (ЧХ) випадкових аргументів не можна виконати внаслідок нелінійного характеру функцій. Для наближеного обчислення ЧХ у такому випадку виконують лінеаризацію в осередку математичного очікування аргументів. Напишемо значення функцій у вигляді $\theta = f(s_i), \phi = g(s_i)$, де $s = (X_B, Y_B, Z_B, \alpha_R, \beta_R, \gamma_R)$. Математичне очікування функцій (9) дорівнюватиме параметрам наведення за відсутності помилок. А дисперсія похибок [14]:

$$\sigma_{\theta}^2 = \sum_{i=1}^6 [f'_{s_i}(s_1, \dots, s_6)]^2 \sigma_i^2 = \left[\operatorname{arctg}'_{X_B} \left(\frac{\sin \theta}{\cos \theta} \right) \right]^2 \sigma_{X_B}^2 + \dots + \left[\operatorname{arctg}'_{\gamma_R} \left(\frac{\sin \theta}{\cos \theta} \right) \right]^2 \sigma_{\gamma_R}^2, \quad (10)$$

$$\sigma_{\phi}^2 = \sum_{i=1}^n \left[g'_{s_i}(s_1, \dots, s_6) \right]^2 \sigma_i^2 = \left[\arctg'_{X_B} \left(\frac{\sin \phi}{\cos \phi} \right) \right]^2 \sigma_{X_B}^2 + \dots + \left[\arctg'_{\gamma_R} \left(\frac{\sin \phi}{\cos \phi} \right) \right]^2 \sigma_{\gamma_R}^2. \quad (11)$$

У межах цієї роботи розглянемо дослідження похибок орієнтування. Також матимемо на увазі, що, крім похибок (10), (11), необхідно враховувати зазначені вище похибки механіки (динамічна похибка датчика кут/код, похибка механіки під час установа датчика на осі обертання тощо).

Дослідження характеру зміни абсолютних значень похибок наведення

Для перевірки припущення про різномірний характер впливу похибок орієнтування на похибки наведення $\delta\theta$ та $\delta\phi$ було проведено попереднє дослідження. За (9) були визначені вектори наведення в умовах відсутності помилок орієнтування. Після чого вводилися помилки, які змінювалися у вісім етапів відповідно до табл. 1 та рис. 2, та визначались вектори наведення за наявності похибок. Різниця, що являє собою величину абсолютної кутової похибки наведення, засвідчила складний характер залежності, що представлено на рис. 3.

Таблиця 1

Порядок змін похибок орієнтування

№ з/п	$\delta\alpha$	$\delta\beta$	$\delta\gamma$
1.	$0 \rightarrow \delta\alpha_{\max}$	0	0
2.	1	$0 \rightarrow \delta\beta_{\max}$	0
3.	$\delta\alpha_{\max} \rightarrow 0$	1	0
4.	0	1	$0 \rightarrow \delta\gamma_{\max}$
5.	$0 \rightarrow \delta\alpha_{\max}$	1	1
6.	1	$\delta\beta_{\max} \rightarrow 0$	1
7.	$\delta\alpha_{\max} \rightarrow 0$	0	1
8.	0	0	$\delta\gamma_{\max} \rightarrow 0$

Результати представлені у вигляді абсолютного значення похибок відповідно до фазових траєкторій (рис. 2) в октогональній полярній площині з напрямом обходу проти годинникової стрілки (рис. 3), де $\alpha(\beta, \gamma): 0 \rightarrow 1$ означає зміну відповідної похибки від нуля до максимального значення, а $\alpha(\beta, \gamma): 1 \rightarrow 0$ – від максимального значення до нуля. У кожному 45-градусному октанті значення двох складників похибки зафіксовані, а значення третьої похибки змінюється від нуля до максимального значення або навпаки.

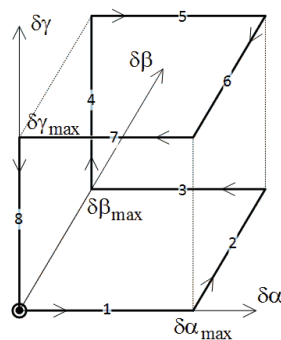


Рис. 2. Фазова траєкторія зміни похибок орієнтування

Аналіз отриманих результатів (рис. 3) засвідчив різномірний характер впливу похибок орієнтування (як за величиною, так і за ступенем впливу) на похибки наведення, що потребує Наукові праці ВНТУ, 2020, № 2

проведення додаткових досліджень.

Якщо застосувати матрицю переходу для аналітичного представлення складників вектора наведення та після застосування правила знаходження похідної складної функції за частковою змінною аналітичний вираз для визначення похибки за азимутом (10) утримує більше 220 складників у вигляді тригонометричних і дробово-раціональних функцій, а вираз для визначення похибки за кутом місця (11) більше – 430 складових у вигляді тригонометричних ступеневих і дробово-раціональних функцій. Аналітичне дослідження похибок наведення в багатомірній площині аргументів представляє певні складнощі, тому наступним етапом досліджень стало проведення модельного експерименту визначення характеру впливу похибок орієнтування на показники похибок наведення.

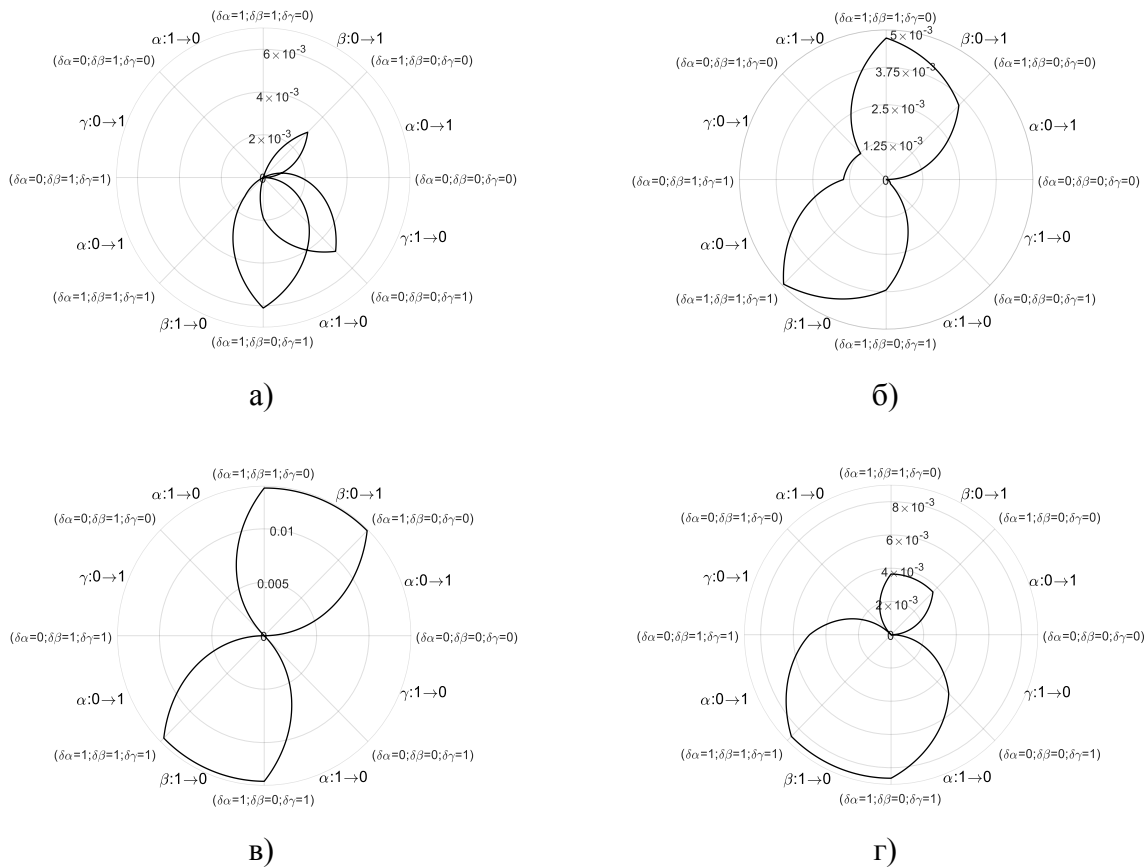


Рис. 3. Приклад зміни похибок наведення: за азимутом $\delta\theta$ (а, в) і кутом місця $\delta\phi$ (б, г) для різних напрямів: $\theta = 45^\circ, \phi = 45^\circ$ (а, б); $\theta = 90^\circ, \phi = 270^\circ$ (в, г)

Модельний експеримент

Для проведення модельного експерименту було розроблено такий алгоритм: організовано послідовну зміну значень параметрів наведення (дискрета вектору наведення); для кожної дискрети вектору наведення визначено координати цілі; далі в тримірному просторі СКВ похибок вектора орієнтування проведено 100 дослідів для конкретного набору похибок, які розподілено за центрованим нормальним законом із обраним на певному кроці СКВ; за результатами визначено параметри розподілу похибок наведення, а саме: СКВ похибок азимуту й кута місця; після зміни СКВ похибок орієнтування цикл повторювався. Отже, СКВ складників похибок $\sigma_\alpha, \sigma_\beta$ та σ_γ розподілено за центрованим нормальним законом із величиною відхилення від $5 \cdot 10^{-5}$ рад (~ 10 кут. сек.) до $5 \cdot 10^{-3}$ рад ($\sim 17,2$ кут. хв.), а дискрети

вектора наведення змінювались у діапазонах: $\theta \in [0; 2\pi]$, $\phi \in [0; 2\pi]$. Ураховуючи складність візуалізації функції трьох змінних, для представлення результатів було обрано спосіб кольорової проекції на тримірну область вхідних аргументів (рис. 4).

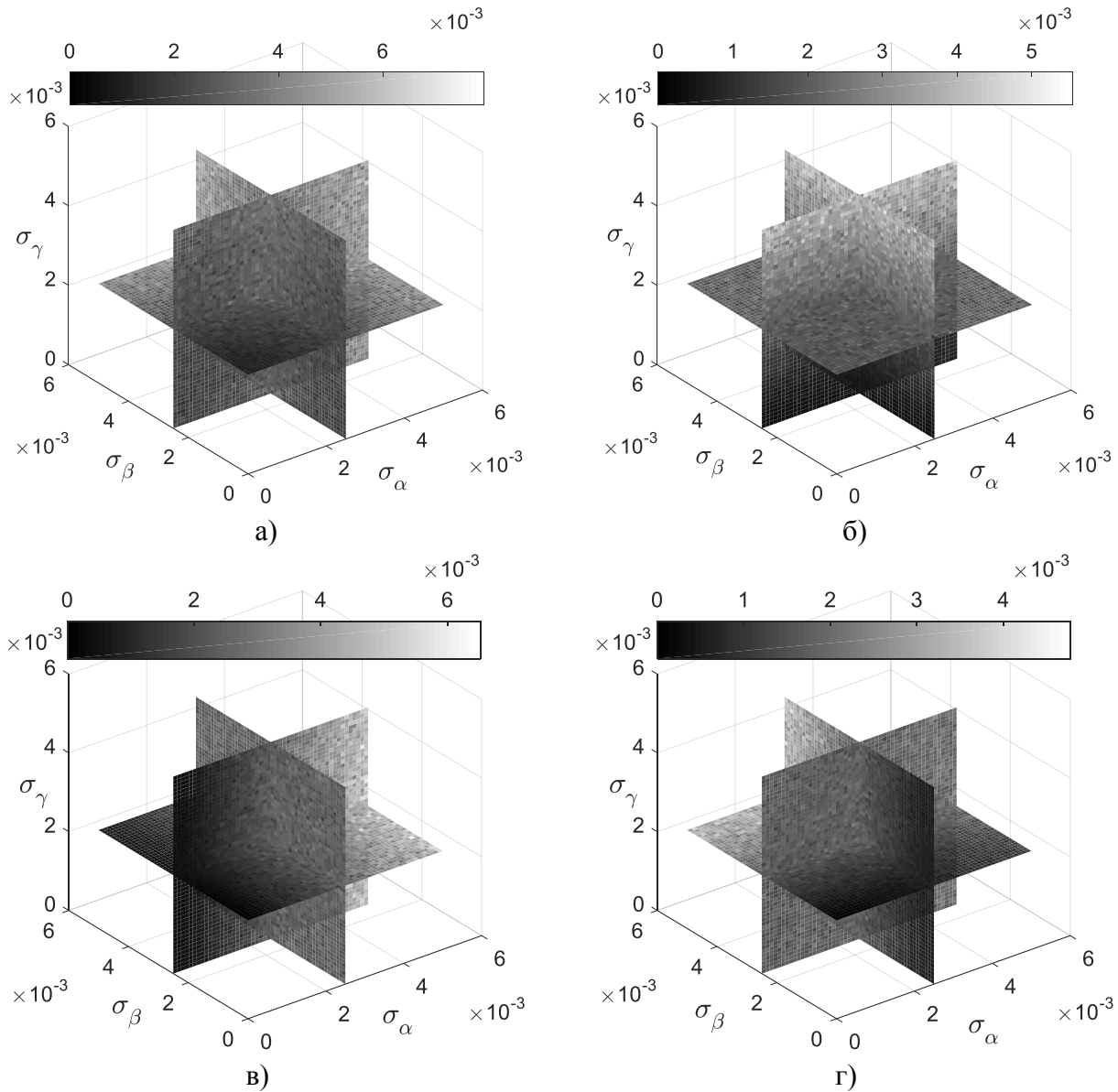


Рис. 4. Окремі результати модельного експерименту визначення розподілу СКВ похибок наведення за азимутом σ_θ (а, в) і за кутом місця σ_ϕ (б, г) залежно від СКВ похибок орієнтування для різних напрямів: $\theta = 90^\circ$, $\phi = 225^\circ$ (а, б); $\theta = 315^\circ$, $\phi = 180^\circ$ (в, г)

Аналіз результатів модельного експерименту дозволив зробити такі висновки:
 для різних пар значень азимут – кут місця за однакових значень вхідних похибок спостерігаються різні за величиною значення дисперсії результативних похибок наведення;
 спостерігаємо нелінійний характер залежності похибок наведення від похибок орієнтування;

в окремих точках області значень азимуту й кута місця виявлено нестійкість рішення задачі пошуку похибок наведення: виявлено суттєві (до декількох порядків) викиди значень дисперсій отриманих похибок.

Дослідження залежності похибок наведення від напрямку на ціль

Для дослідження залежності похибок наведення від напрямку на ціль було обрано метод фіксації величини дисперсії похибок наведення й дослідження похибок наведення в області значення можливих напрямів на ціль. Для цього аналітичні вирази для (10) та (11) було представлено у вигляді програмних модулів обчислення величини дисперсії похибок наведення. Отже, хоча прямий функціональний аналіз (10) та (11) здійснити важко, проте їх можна застосовувати для окремих досліджень.

На першому етапі було встановлено періодичний характер зміни похибок, а також наявність осередків максимальних і мінімальних значень СКВ похибок наведення (рис. 5).

Також було досліджено характер зміни похибок за різних величин складників похибок вектора орієнтування (рис. 6).

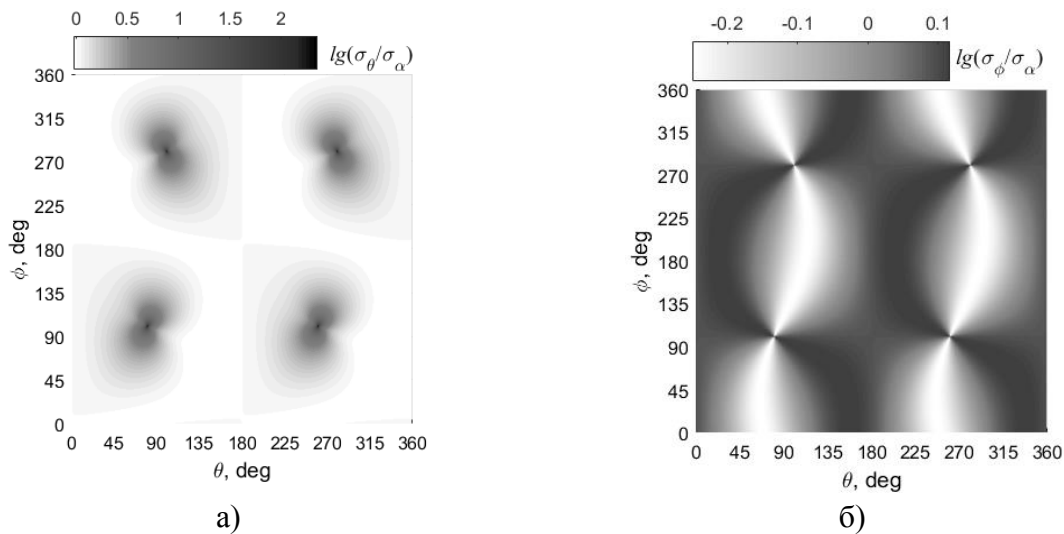


Рис. 5. Результати дослідження періодичності та СКВ похибок наведення за азимутом (а) та за кутом місця (б) залежної від напрямку на ціль для $\sigma_\alpha = \sigma_\beta = \sigma_\gamma = 5 \cdot 10^{-3}$ рад ($\sim 17,2$ кут. хв.)

Аналіз отриманих результатів дозволив зробити такі висновки:

екстремум для СКВ похибки азимуту та кута місця (має вигляд точки перегину) розташований близько напрямку $(\theta, \phi) \approx (80^\circ, 100^\circ)$;

установлено наявність областей мінімальних і максимальних похибок наведення в області значень азимуту та кута місця, розташування зазначених областей залежить від співвідношення величин похибок орієнтування.

Здійснено числовий пошук екстремумів СКВ похибок для різних значень СКВ похибок орієнтування симплекс-методом Нелдера-Міда. Результати аналізу впливу похибок орієнтування на положення екстремумів похибок наведення дозволяють зробити такі висновки:

точка $(\theta, \phi) \approx (79,8^\circ; 100^\circ)$ є точкою розриву другого роду для СКВ похибок наведення за азимутом, у якій σ_θ суттєво зростають;

обраний метод пошуку екстремумів засвідчив нестійкість до зміни вхідних даних щодо пошуку аргументів екстремальних значень, що разом із результатами аналізу графічних результатів (рис. 5 – 6) дозволяє говорити про певні області мінімальних або максимальних значень СКВ похибок.

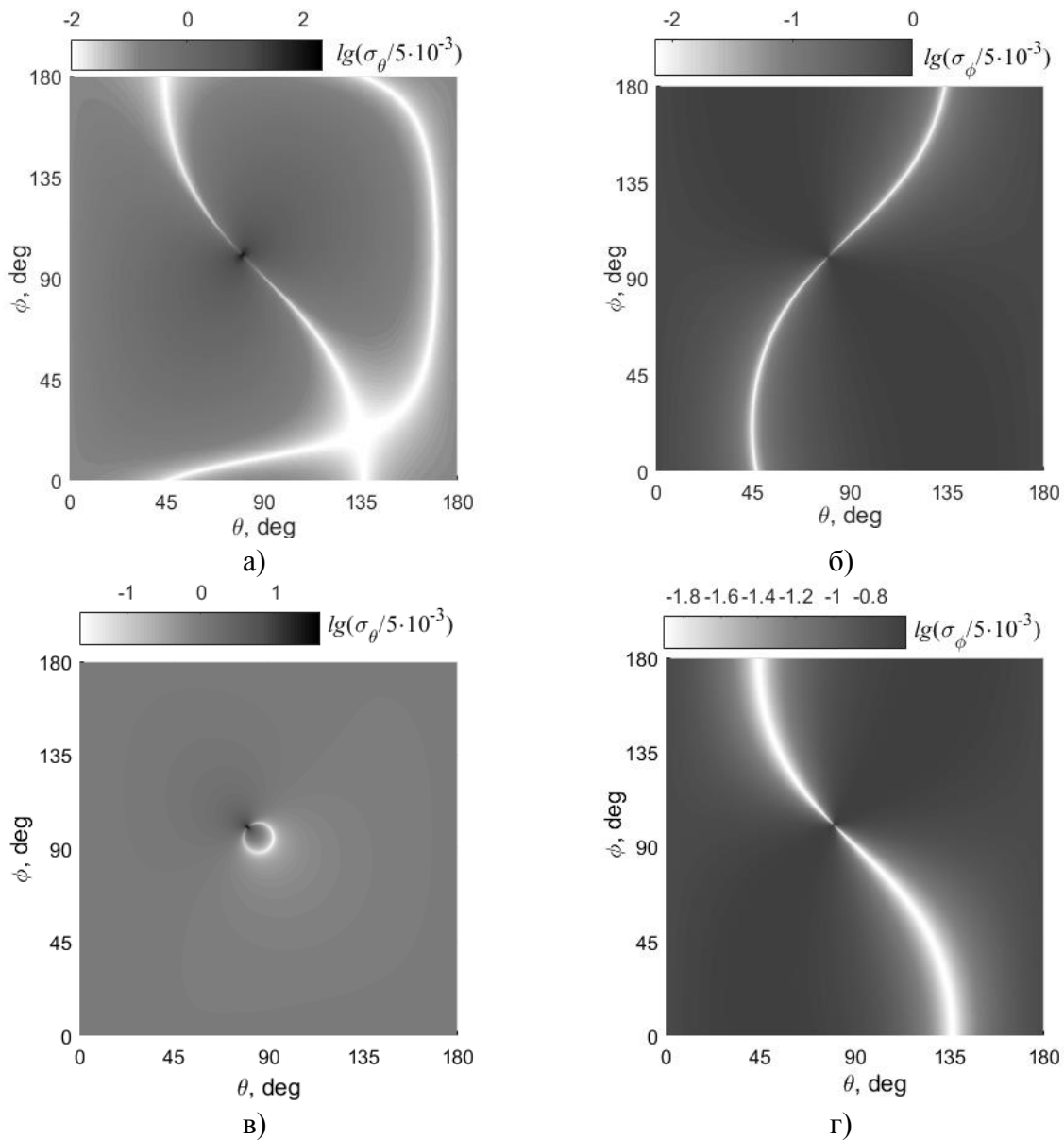


Рис. 6. Окремі результати дослідження СКВ похибок наведення за азимутом (а, в) та за кутом місця (б, г) залежно від напрямку на ціль для різного співвідношення похибок: $\sigma_\alpha = 5 \cdot 10^{-5}$ рад, $\sigma_\beta = 5 \cdot 10^{-5}$ рад, $\sigma_\gamma = 5 \cdot 10^{-3}$ рад (а, б); $\sigma_\alpha = 5 \cdot 10^{-5}$ рад, $\sigma_\beta = 5 \cdot 10^{-3}$ рад, $\sigma_\gamma = 5 \cdot 10^{-5}$ рад (в, г)

Висновки

Отже, у статті формалізовано та узагальнено математичні співвідношення й методичні підходи до визначення залежності похибок наведення від похибок орієнтування носія.

У результаті проведених досліджень встановлено:

1. Похибки наведення функціонально залежать від похибок орієнтування, їх не можна вважати незалежними.

2. В області значень можливого взаємного розташування та орієнтування носія й цілі існують області мінімальних і максимальних похибок наведення. Для застосування засобів направленої дії можна використовувати спосіб завчасного раціонального орієнтування носія для зменшення похибок наведення.

Напрямок подальших досліджень можна визначити розроблення методичних і технічних рекомендацій щодо мінімізації похибок наведення до прийняттого значення та недопущення

їх попадання в область максимальних значень.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Orbons S. Do Non-Lethal Capabilities License to ‘Silence’? / Sjef Orbons // Journal of Military Ethics. – 2010. – Vol. 9, Iss. 1. – P. 78 – 99.
2. Матлин И. И. Радиолокация : учеб. пособие для солдат и сержантов / И. И. Матлин. – М. : Воениздат МО СССР, 1960. – 443 с.
3. Мосиенко С. А. Концепция построения наземного робототехнического ударного комплекса. Издание второе, дополненное / С. А. Мосиенко, В. И. Лохтин. – М. : «САМПОЛИГРАФИСТ», 2014. – 122 с.
4. Момот Р. В. Вплив характеристик антен на точність визначення координат джерела випромінювання / Р. В. Момот, Г. В. Худов // Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних Сил. – 2013. – Вип. 2 (35). – С. 58 – 61.
5. Дослідження системи наведення та побудова “карти похибок” для телескопу ТПЛ-1М на основі спостережень зірок / С. І. Ігнатович, Я. М. Мотрунич, І. Ф. Найбауер [та ін.] // Науковий вісник Ужгородського університету, Серія Фізика. – 2008. – Вип. 22. – С. 105 – 110.
6. Recommendation ITU-R S. 1064-1 Pointing accuracy as a design objective for earthward antennas On Board Geostationary Satellites in the Fixed-Satellite Service, 1994-1995 [Електронний ресурс] // Режим доступу : https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/s/R-REC-S.1064-1-199510-I!!PDF-E.pdf.
7. Telescope Fabra ROA Montsec : A New Robotic Wide Field Baker–Nunn Facility / Octavi Fors, Jorge Núñez, José Luis Muiños [et al.] // Publications of the Astronomical Society of the Pacific. – 2013. – Vol. 125, № 927. – P. 522 – 538. DOI: 10.1086/670941.
8. First Scientific VLBI Observations Using New Zealand 30 Meter Radio Telescope WARK30M / L. Petrov, T. Natusch, S. Weston [et al.] // Publications of the Astronomical Society of the Pacific. – 2015. – Vol. 127, № 952. – P. 516 – 522. DOI: 10.1086/681965.
9. Теоретические основы радиолокации / [А. А. Коростелев, Н. Ф. Клюев, Ю. А. Мельник и др.] ; под ред. В. Е. Дулевича. – М. : Сов. радио, 1978. – 608 с.
10. Мамон В. А. Баллистическое обеспечение полетов / В. А. Мамон. – Л. : ВИКУ им. Можайского, 1990. – 623 с.
11. Аммерал Л. Принципы программирования в машинной графике / Л. Аммерал ; пер. с англ. В. А. Львова. – М. : “Сол Систем”, 1992. – 224 с.
12. Рапопорт Л. Б. Метод определения относительной ориентации / Л. Б. Рапопорт // Проблемы управления. – 2010. – Вып. 5. – С. 57 – 64.
13. ISO 11606:2000. Суда и морские технологии. Морские электромагнитные компасы, 2000 [Електронний ресурс] // Режим доступу : <http://www.sis.se/document/preview&usg=AOvVaw0W1jTaR7Qj13TNot6gX170>.
14. Вентцель Е. С. Теория вероятностей : учеб. для вузов. – 6-е изд. стереотип. / Е. С. Вентцель. – М. : Высш. шк., 1999. – 576 с.

Стаття надійшла до редакції 12.06.2020 р.

Стаття пройшла рецензування 20.06.2020 р.

Білобородов Олег Олександрович – к. т. н., докторант в/ч А4566, спеціальність 05.13.06 інформаційні технології.

Центральний науково-дослідний інститут озброєння та військової техніки Збройних Сил України, Військова частина А4566.