

УДК 681.518.2

К.С. Козелкова

Національний університет оборони України, Київ

ПСЕВДОСУПУТНИКОВІ РАДІОНАВІГАЦІЙНІ СИСТЕМИ, ЇХ СТВОРЕННЯ ТА ОПТИМІЗАЦІЯ СТРУКТУРИ МЕРЕЖІ

Запропоновані методи створення мережі псевдосупутникових радіонавігаційних систем (ПС РНС) на основі ефективності технічної системи. Розглянуті питання тісного зв'язку критеріїв ефективності з визначенням геометричної структури ПС РНС взагалі та зон дії радіонавігаційних точок зокрема.

Ключові слова: псевдосупутник (ПС), супутникова радіонавігаційна система (СРНС), мережа псевдосупутникової РНС, кут височіння, псевдодалекомірний спосіб, зона дії.

Вступ

Ефективність функціонування ПС РНС являє собою ймовірність виконання завдання навігації (визначення місцезнаходження) із заданою точністю. В основі оцінки ефективності будь-якої технічної системи неодмінно лежить процедура, пов'язана з вибором та обґрунтуванням критеріїв ефективності (КЕ). Для того щоб сказати, чи відповідає система встановленим вимогам, а також щоб можна було порівнювати різні системи необхідно, в першу чергу, визначити аспект розгляду під яким розглядається та чи інша система. Такі аспекти і відображаються за допомогою відповідних критеріїв. При створенні структури мережі псевдосупутникових радіонавігаційних систем необхідно зазначити, що це питання тісно пов'язується з визначенням геометричної структури ПС РНС та зон дії радіонавігаційних точок. На відміну від СРНС максимальна дальність дії ПС обмежена.

Аналіз останніх досліджень і публікацій [1 – 6] показує, що для визначення координат за допомогою ПС РНС псевдодалекомірним способом необхідно щоб у полі зору споживача (С) одночасно знаходились не менше чотирьох ПС. Тому зони дії необхідного числа ПС повинні “накладатись” одна на одну. При розташуванні чотирьох опорних точок ПС у вигляді будь-якої чотирикутної фігури, при умові однакових радіусів дії усіх ПС, для того щоб площа взаємного перекриття була більшою від нуля необхідно щоб опорні точки повітряних ПС лежали у межах кола такого ж радіусу.

Метою статті являється розроблення геометричної структури ПС РНС взагалі та зон дії радіонавігаційних точок зокрема і визначення її ефективності у випадку застосування ПС повітряного базування, дальності дії такої системи для наземних та повітряних С, впливів, що обмежують дальність прямої видимості ПС споживачем.

Основна частина

Для оцінки можливостей псевдосупутникових радіонавігаційних систем (ПС РНС) та можливості

виконання бойового завдання взагалі необхідно обґрунтувати кількісний критерій, який дозволяє порівнювати існуючі проекти такої системи та встановлювати вимоги щодо їх технічних параметрів.

Щоб можна було судити про ефективність та порівнювати між собою різні за структурою та властивостями засоби озброєння одного і того ж призначення, критерій ефективності (КЕ) повинен характеризувати засіб як єдине ціле, тобто володіти синтезуючою здатністю, яка враховує усі його властивості. Ефективність повинна виражатись одним числом, бути критичною до змін основних характеристик засобів та визначатись з достатньою для практики точністю.

Оскільки основною умовою виконання бойового завдання є вирішення завдань обома підсистемами, але взагалі ураження об'єкта неможливе без точного місцевизначення, то критерій ефективності – ймовірність виконання бойового завдання дорівнюватиме

$$P(B) = P(B1)P(B2/B1), \quad (1)$$

де $P(B1)$ – ймовірність визначення місцезнаходження засобу ураження з припустимою похибкою;

$P(B2/B1)$ – умовна ймовірність вирішення завдання комплексом озброєння.

Узагальнений критерій ефективності функціонування ПС РНС буде являти собою ймовірність виконання завдання навігації (визначення місцезнаходження) із заданою точністю і матиме вигляд

$$P(B1) = P(A_1)P(A_2)P(A_3/A_2) = W(t) = P_{НАС}(t)P_N(t)P_{ТОЧ}(t), \quad (2)$$

де $P_{НАС}(t) = P(A_1)$ – ймовірність безвідмовної роботи НАС протягом заданого часу t ;

$P_N(t) = P(A_2)$ – ймовірність знаходження більше чотирьох ПС у полі зору споживача;

$P_{ТОЧ}(t) = P(A_3/A_2)$ – ймовірність того, що точнісні характеристики системи будуть знаходитись у встановлених межах.

У виразах (1) та (2) показник ефективності представлено лише у самому загальному вигляді. Для того щоб можна було реально обчислити ймовірність виконання завдання відповідною системою (підсистемою) необхідно розкрити та наповнити змістом ці залежності.

Облишивши поки що перший множник з правої частини (2), який є предметом розгляду теорії надійності технічних систем, розглянемо більш детально інші складові (2). $P_N(t)$ – ймовірність знаходження більше чотирьох ПС у полі зору споживача протягом певного часу t .

З самого початку розгляду необхідно зазначити, що це питання тісно пов'язується з визначенням геометричної структури ПС РНС взагалі та зон дії радіонавігаційних точок зокрема. На відміну від СРНС максимальна дальність дії ПС обмежена (рис. 1).

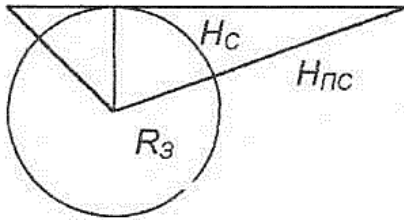


Рис. 1. Визначення дальності прямої видимості ПС

У випадку застосування ПС повітряного базування дальність дії такої системи для наземних та повітряних С обмежується дальністю прямої видимості ПС споживачем. Умова прямої видимості ПС споживачем реалізується виходячи з відомих співвідношень:

$$\begin{aligned} D_{ПВ} &= D_1 + D_2; \\ D_1 &= ((R_3 + H_{Пс})^2 - R_3^2)^{1/2}; \\ D_2 &= ((R_3 + H_{Пс})^2 - R_3^2)^{1/2}. \end{aligned} \quad (3)$$

Як видно з (3) зі збільшенням висоти С над землею дальність прямої видимості також збільшується. Але низка завдань, які виконуються військами в умовах бойових дій вимагає щоб навігаційне поле було доступним навіть для наземних споживачів. Тоді дальність прямої видимості становитиме $D_{ПВ} = D_2$.

На практиці, при проведенні оперативно-тактичних розрахунків з прийнятною точністю, як правило, користуються формулою

$$D_{ПВ} \approx 110\sqrt{H_{Пс}}. \quad (4)$$

Але для стійкої роботи НАС на поверхні Землі кожен ПС повинен спостерігатись з землі під певним кутом (кутом височіння) $\theta > 0$. Для СРНС цей кут складає 5 – 15°.

Визначимо, чому ж буде дорівнювати віддаль від С до ПС при умові спостережності ПС під кутом височіння θ (рис. 2). Виконавши нескладні розрахунки, можна показати, що дальність прямої видимості О між С та ПС при куті місця θ дорівнює

$$D = \frac{(R_3 + H_{Пс})}{\cos \theta} \cos \left(\theta + \arcsin \left(\frac{R_3 \cos \theta}{R_3 + H_{Пс}} \right) \right). \quad (5)$$

Досліджуючи значення D при різних значеннях θ можна побачити, що при $\theta = 0^\circ$ (ПС знаходиться на горизонті

$$D = \sqrt{(R_3 + H_{Пс})^2 - R_3^2}. \quad (6)$$

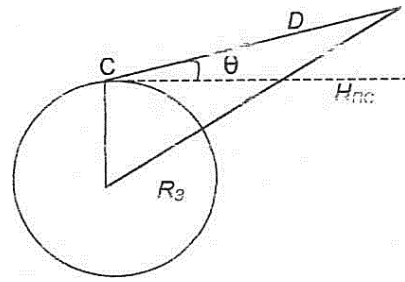


Рис. 2. Визначення дальності прямої видимості ПС з урахуванням кута височіння

При $\theta = 90^\circ$ (ПС знаходиться у зеніті)

$$\begin{aligned} D &= \frac{(R_3 + H_{Пс}) \cos(90^\circ + \arcsin(0))}{\cos(90^\circ)} = \\ &= \frac{(R_3 + H_{Пс}) \cos(90^\circ)}{\cos(90^\circ)} = \frac{0}{0}. \end{aligned} \quad (7)$$

Перейшовши до границі та застосувавши основні теореми про границі функцій можна показати, що

$$\begin{aligned} &\lim_{\theta \rightarrow \pi/2} \frac{(R_3 + H_{Пс}) \cos \left(\theta + \arcsin \left(\frac{R_3 \cos \theta}{R_3 + H_{Пс}} \right) \right)}{\cos \theta} = \\ &= (R_3 + H_{Пс}) \lim_{\theta \rightarrow \pi/2} \cos \left(\arcsin \left(\frac{R_3 \cos \theta}{R_3 + H_{Пс}} \right) \right) - \\ &-(R_3 + H_{Пс}) \lim_{\theta \rightarrow \pi/2} \frac{R_3 \sin \theta}{R_3 + H_{Пс}} = (R_3 + H_{Пс}) \cdot 1 - R_3 \cdot 1 = H_{Пс}. \end{aligned} \quad (8)$$

Тобто, при збільшенні кута місця ПС до 90° відстань від наземного С до ПС скорочується до висоти $H_{Пс}$ над поверхнею Землі.

Але отриманий вираз (6) для дальності прямої видимості ПС дає уяву лише про похилу дальність від С до ПС. Для побудови мережі ПС у певному районі необхідно оперувати віддальми між проекціями точок розташування ПС на поверхню Землі. Оскільки величина $H_{Пс}$ має порядок удвічі менший ніж D , то з прийнятною точністю можна вважати

$$d = \sqrt{D^2 - H_{Пс}^2}. \quad (9)$$

Очевидно, що при збільшенні $H_{Пс}$ збільшується і загальна дальність дії ПС РНС. Таким чином, з метою збільшення дальності дії ПС РНС, збільшення площі покриття і, відповідно, зменшення загальної кількості ПС, необхідних для створення РНП у необхідному районі, необхідно максимально збільшувати висоту ПС. Залежність кута височіння ПС (θ), який знаходиться на висоті 8 км, від геодезичної віддалі наземного С від його опорної точки (L) при припущенні відсутності рельєфу місцевості ілюструється на рис. 3.

Як бачимо, якщо мінімальний кут височіння збільшиться з 5° до 15° то дальність прямої видимості С – ПС зменшиться з 90 км до 35 км. Зрозуміло, що зі збільшенням висоти С над землею дальність прямої видимості буде збільшуватись.

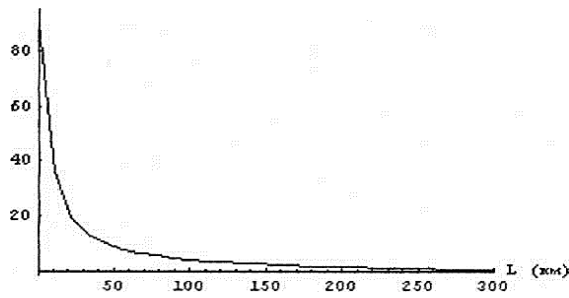


Рис. 3. Залежність кута височіння ПС від геодезичної віддалі наземного С

Як відомо, для визначення координат за допомогою ПС РНС псевдодалекомірним способом необхідно щоб у полі зору споживача одночасно знаходились не менше чотирьох ПС. Тому зони дії необхідного числа ПС повинні “накладатись” одна на одну. При розташуванні чотирьох опорних точок ПС у вигляді будь-якої чотирикутної фігури, при умові однакових радіусів дії усіх ПС, для того щоб площа взаємного перекриття була більшою від нуля необхідно щоб опорні точки повітряних ПС лежали у межах кола такого ж радіусу.

Площу зони, у якій одночасно спостерігаються чотири ПС можна обчислити за допомогою методів та правил тригонометрії. Чотири ПС утворюють елементарну чарунку з площею взаємного перекриття S_0 . З декількох таких елементарних чарунок можна побудувати мережу ПС на площі заданої території.

З метою спрощення розрахунків будемо розглядати лише основні правильні фігури, які утворюються при побудові чотирьох ПС – чотирикутник та трикутник з центральною точкою.

Площа фігури, яка утворюється у результаті чотирикратного перекриття кругових зон дії ПС, опорні точки яких розташовані у формі квадрата буде складатися з площі чотирикутника S_{\square} та чотирьох площ сегментів $S_{(4)}$ (рис. 4).

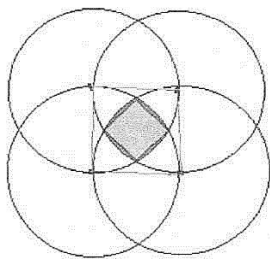


Рис. 4. Елементарна чотирикутна чарунка

$$S_0 = S_{\text{КВ}} = S_{\square} + 4S_{(4)}; \quad (10)$$

$$S_{\square} = \left(R\sqrt{2} \cos\left(\arcsin\frac{d}{2R}\right) - \frac{d\sqrt{2}}{2} \right)^2; \quad (11)$$

$$S_{(4)} = \frac{R^2}{2} \left(\frac{\pi(90^\circ - 2\arcsin(d/(2R)))}{180} - \cos(2\arcsin(d/(2R))) \right); \quad (12)$$

де R – радіус зони дії одного ПС; d – відстань між опорними точками ПС елементарної чарунки; S_{\square} – площа квадрата, який утворюється у результаті перетину чотирьох кругових зон дії ПС; $S_{(4)}$ – площа додаткового сегмента.

При побудові елементарної чарунки у формі трикутника з центральною точкою таку фігуру можна розглядати як сукупність двох фігур – випуклого трикутника, утвореного перетином трьох кругових зон дії ПС та кругової зони дії четвертого ПС.

З урахуванням того, що зони дії усіх ПС мають однаковий радіус, можна показати, що площа перетину зон дії трьох ПС є поєднанням площі трикутника S_{\triangle} та трьох сегментів $S_{(3)}$ (рис. 5).

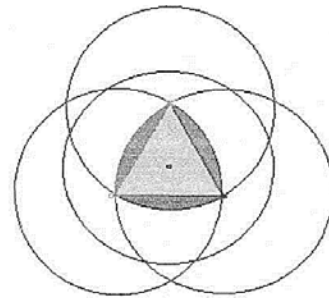


Рис. 5. Трикутна елементарна чарунка

$$S_{\text{ТР}} = S_{\triangle} + 3S_{(3)}; \quad (13)$$

$$S_{\triangle} = \sqrt{3} \left(\frac{1}{2} \sqrt{3R^2 - \frac{3d^2}{4}} - \frac{d}{4} \right)^2; \quad (14)$$

$$S_{(3)} = \frac{\pi R^2}{180} \arcsin\left(\frac{\sqrt{12R^2 - 3d^2} - d}{4R}\right) - R^2 \times \left(\frac{\sqrt{12R^2 - 3d^2} - d}{4R} \right) \cdot \cos\left(\arcsin\left(\frac{\sqrt{12R^2 - 3d^2} - d}{4R}\right)\right); \quad (15)$$

де S_{\triangle} , $S_{(3)}$ – площі трикутника та додаткового сегмента.

Таким чином, оперуючи трикутними та чотирикутними елементарними чарунками, можна створити суцільне радіонавігаційне поле чотирикратного покриття. Для того щоб при цьому було задіяно якомога менше ПС, а саме поле не мало пропусків, тобто було суцільним, необхідно, щоб відстані між найвіддаленішими ПС у елементарній чарунці дорівнювали радіусу зони дії ПС $d = R$.

На рис. 6 показано приклади утворення суцільного РНП шляхом сполучення елементарних чарунок. Як бачимо, у такому полі існують зони чотирикратного, а також п'яти- та шестикратного перекриття зон дії окремих ПС. З метою здешевлення системи необхідно досягати мінімуму площі зон, у яких кратність перекриття є більшою, ніж 4. Але, оскільки зони кругові, то це неможливо, бо при збільшенні відстаней між ПС до певного критичного значення $d > R$ (у випадку квадратних чарунок) у суцільному РНП почнуть з'являтися розриви.

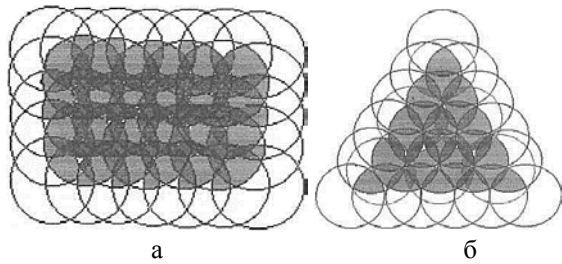


Рис. 6. Комбінація з елементарних чарунок ПС у формі квадратів (а) та трикутників (б)

Припустимо, що існує суцільне РНП, для побудови якого було залучено N псевдосупутників. При побудові такого поля за умови, що відстань між двома опорними точками ПС буде дорівнювати $d = R$ (довжина сторони квадрата при квадратній конфігурації елементарних чарунок) утворяться зони чотирикратного, п'яти та шестикратного перекриття. Якщо припустити, що у результаті протидії противника було виведено з ладу (знищено) m ПС, то площа чотирикратного перекриття зменшиться і у суцільному полі з'являться розриви. При спробі визначити своє місцезнаходження споживач, який знаходиться у таких розривах не буде спостерігати достатньої кількості ПС і сама процедура визначення стане неможливою.

Ймовірність одночасного спостереження чотирьох та більше ПС споживачем протягом часу t дорівнюватиме

$$P_N(t) = P_{n \geq 4} = 1 - \frac{S_{\text{ВТР}}(t)}{S}, \quad (16)$$

де $S_{\text{ВТР}}(t)$ – площа чотирикратного покриття, яку втрачено в результаті протидії противника; S – загальна площа суцільного РНП. Величини $S_{\text{ВТР}}$ та S обчислюються у кожному конкретному випадку окремо з урахуванням попередньо розглянутих положень, оскільки ці площі у загальному випадку залежать від взаємного розташування елементарних чарунок.

Висновки

Проведені у статті дослідження дозволяють зробити наступні висновки:

1. При збільшенні НПС збільшується і загальна дальність дії ПС РНС. Таким чином, з метою збіль-

шення дальності дії ПС РНС, збільшення площі покриття і, відповідно, зменшення загальної кількості ПС, необхідних для створення РНП у необхідному районі, необхідно максимально збільшувати висоту ПС.

2. Зони дії необхідного числа ПС повинні “накладатись” одна на одну. При розташуванні чотирьох опорних точок ПС у вигляді будь-якої чотирикутної фігури, при умові однакових радіусів дії усіх ПС, для того щоб площа взаємного перекриття була більшою від нуля необхідно щоб опорні точки повітряних ПС лежали у межах кола такого ж радіусу.

3. З метою спрощення розрахунків будемо розглядати лише основні правильні фігури, які утворюються при побудові чотирьох ПС – чотирикутник та трикутник з центральною точкою.

4. Оперуючи трикутними та чотирикутними елементарними чарунками, можна створити суцільне радіонавігаційне поле чотирикратного покриття. Для того щоб при цьому було задіяне якомога менше ПС, а саме поле не мало пропусків, тобто було суцільним, необхідно, щоб відстані між найвіддаленішими ПС у елементарній чарунці дорівнювали радіусу зони дії ПС $d = R$.

Список літератури

1. Петров Н.Н. Системы и комплексы технических средств местоопределения подвижных объектов. [Электрон. ресурс]. – Режим доступа до ресурса: <http://st.ess.ru/redaction/index.htm>.
2. Application of geodesy to engineering. [Электрон. ресурс]. – Режим доступа до ресурса: www.gfy.ku.dk.
3. Болдырев В.С. Беспилотники вместо спутников / В.С. Болдырев, В.П. Заколядажный, Б.И. Лобойко // Независимое военное обозрение. – 2002. – № 23. – С. 42-46.
4. Каримов А. В России задумались над беспилотниками / А. Каримов, В. Ильин // Независимое военное обозрение. – 2001. – № 14. – С. 53-57.
5. United States Department of Defense Contract. [Электрон. ресурс]. – Режим доступа до ресурса: www.defenselink.mil.
6. Шебшаевич В.С. Введение в теорию космической навигации / В.С. Шебшаевич. – М.: Советское радио, 1971. – 296 с.

Надійшла до редколегії 16.07.2013

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Л.Ф. Купченко Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків.

ПСЕВДОСПУТНИКОВЫЕ РАДИОНАВИГАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ, ИХ СОЗДАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ СТРУКТУРЫ СЕТИ

Е.С. Козелкова

Предложены методы создания сети псевдоспутниковых радионавигационных систем на основе эффективности технической системы. Рассмотрены вопросы тесной связи критериев эффективности с определением геометрической структуры ПС РНС вообще и зон действия радионавигационных точек в частности.

Ключевые слова: псевдоспутник (ПС), спутниковая радионавигационная система (СРНС), сеть псевдоспутниковой РНС, угол возвышения, псевдодальномерный способ, зона действия.

PSEUDOSATELLITES RADIONAVIGATION SYSTEM, THEIR CREATION AND OPTIMIZATION OF NETWORK

E.S. Kozelkova

Pseudosatellite navigation system network creation methods based on technical system effectiveness proposed. Closely related questions of performance criteria with PS SRNS geometrical structure determination in general and navigation points areas in particular.

Keywords: pseudosatellites (PS), satellite radionavigation system (SRNS), pseudosatellites SRNS network, elevation angle, pseudosatellite method, coverage area.