

Литература

1. Королев, А. В. *Адаптивная маршрутизация в корпоративных сетях* / А. В. Королев, Г. А. Кучук, А. А. Пашнев. — Х.: ХВУ, 2003. — 224 с.

2. Бондарчук, А. П. *Розрахунок максимальних значень інтенсивності потоків даних між окремими вузлами інфокомунікаційної мережі* / А. П. Бондарчук // *Сучасний захист інформації*. — 2015. — № 2.

К. В. Подмастерьев, С. В. Козелков, А. П. Бондарчук, Н. В. Коршун

СПОСІБ РОЗРАХУНКУ МАКСИМАЛЬНИХ ЗНАЧЕНЬ ІНТЕНСИВНОСТІ ПОТОКІВ ДАНИХ МІЖ ВУЗЛАМИ МЕРЕЖІ

Запропоновано спосіб розрахунку максимальних значень інтенсивності потоків даних між вузлами мережі як частинний випадок методу адаптивної маршрутизації.

K. V. Podmasteriev, S. V. Kozelkov, A. P. Bondarchuk, N. V. Korshun

DESIGN WAY OF MAXIMUM VALUES OF DATA FLOWS BETWEEN NETWORK NODES INTENSITY

The design way of maximum values of data flows between networks nodes intensity as part event of the adaptive routing method is proposed.

УДК 681.518.2

О. В. ШУЛЬГА,

Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка, Україна

СТВОРЕННЯ ТА ОПТИМІЗАЦІЯ СТРУКТУРИ МЕРЕЖІ ПСЕВДОСУПУТНИКОВИХ РАДІОНАВІГАЦІЙНИХ СИСТЕМ

Запропоновано методи створення мережі псевдосупутникових радіонавігаційних систем (ПС РНС) на основі ефективності технічної системи. Розглянуто питання тісного зв'язку критеріїв ефективності з визначенням геометричної структури ПС РНС взагалі та зон дії радіонавігаційних точок зокрема. На відміну від супутникових радіонавігаційних систем (СРНС), максимальна дальність дії ПС обмежена. Проведені розрахунки показують, що дальність прямої видимості об'єкта (О) між споживачем (С) і ПС та стійкість роботи НАС залежать від кута височіння відносно поверхні Землі, тобто кожний ПС має спостерігатись із Землі під певним кутом. Визначено, що для збільшення дальності дії ПС РНС, збільшення площі покриття і, відповідно, зменшення загальної кількості ПС, потрібних для створення РНП у зазначеному районі, необхідно максимально збільшувати висоту ПС. Доведено, що для визначення координат за допомогою ПС РНС псевдодалекомірним способом необхідно, щоб у полі зору споживача одночасно перебували не менш як чотири ПС. Тому зони дії відповідної кількості ПС мають «накладатись» одна на одну.

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

Вступ

Ефективність функціонування псевдосупутникових радіонавігаційних систем (ПС РНС) оцінюється ймовірністю виконання завдання навігації (визначення місцезнаходження) із заданою точністю.

В основу оцінювання ефективності будь-якої технічної системи неодмінно покладено процедуру, пов'язану 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, передусім, визначити аспект, в якому розглядається та чи інша система. Такі аспекти й подаються за допомогою відповідних критеріїв.

При створенні структури мережі псевдосупутникових радіонавігаційних систем слід узяти до уваги, що це питання тісно пов'язане з визначенням геометричної структури ПС РНС та зон дії радіонавігаційних точок. На відміну від СРНС, ПС мають обмежену максимальну дальність дії.

Аналіз останніх досліджень і публікацій показує, що для визначення координат за допомогою

ПС РНС псевдодалекомірним способом необхідно, щоб у полі зору споживача (С) одночасно перебували не менш як чотири ПС. Тому зони дії необхідної кількості ПС мають «накладатись» одна на одну. При розташуванні чотирьох опорних точок ПС у вигляді будь-якої чотирикутної фігури за умови однакових радіусів дії всіх ПС для того, аби площа взаємного перекриття була більша від нуля, необхідно, щоб опорні точки повітряних ПС лежали в межах кола такого самого радіуса.

Мета статті — розроблення геометричної структури ПС РНС взагалі та зон дії радіонавігаційних точок зокрема, а також визначення, по-перше, її ефективності в разі застосування ПС повітряного базування; по-друге, дальності дії такої системи для наземних і повітряних С; по-третє, впливів, що обмежують дальність прямої видимості ПС споживачем.

Основна частина

Для оцінювання можливостей ПС РНС, зокрема й щодо виконання бойового завдання, необхідно обґрунтувати кількісний критерій, який дозволив

би порівнювати наявні проекти такої системи та встановлювати вимоги стосовно їх технічних параметрів.

Щоб можна було судити про ефективність і порівнювати між собою різні за структурою та властивостями засоби озброєння одного й того самого призначення, КЕ має характеризувати засіб як єдине ціле, тобто володіти синтезувальною здатністю, з урахуванням усіх його властивостей. Ефективність має виражатись одним числом, бути критичною до змін основних характеристик засобів та визначатися з достатньою для практики точністю.

Основною передумовою виконання бойового завдання є розв'язання окремих завдань усіма діючими підсистемами. Проте зрештою ураження об'єкта неможливе без точного місцевизначення. Тому критерій ефективності, що являє собою ймовірність виконання бойового завдання, дорівнюватиме

$$P(B) = P(B_1)P(B_2/B_1), \quad (1)$$

де $P(B_1)$ — ймовірність визначення місцезнаходження засобу ураження з припустимою похибкою; $P(B_2/B_1)$ — умовна ймовірність розв'язання завдання комплексом озброєння.

Узагальнений критерій ефективності функціонування ПС РНС виступатиме як ймовірність виконання завдання навігації (визначення місцевизнаходження) із заданою точністю і матиме вигляд

$$P(B_1) = P(A_1)P(A_2)P(A_3/A_2) = W(t) = P_{\text{НАС}}(t)P_N(t)P_{\text{точ}}(t), \quad (2)$$

де $P_{\text{НАС}}(t) = P(A_1)$ — ймовірність безвідмовної роботи НАС протягом заданого часу t ; $P_N(t) = P(A_2)$ — ймовірність перебування більш як чотирьох ПС у полі зору споживача; $P_{\text{точ}}(t) = P(A_3/A_2)$ — ймовірність того, що точнісні характеристики системи міститимуться в установлених межах. У виразах (1) і (2) показник ефективності подано лише в найзагальнішому 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 із правої частини (2), який є предметом розгляду теорії надійності технічних систем, розглянемо докладно інші складові (2).

$P_N(t)$ — ймовірність перебування більш як чотирьох ПС у полі зору споживача протягом певного часу t .

Передусім зазначимо, що це питання тісно пов'язане з визначенням геометричної структури ПС РНС взагалі та зон дії радіонавігаційних точок зокрема. На відміну від СРНС, ПС мають обмежену максимальну дальність дії ПС (рис. 1).

У разі застосування ПС повітряного базування дальність дії такої системи для наземних і повітряних С обмежується дальністю прямої видимості ПС із погляду споживача.

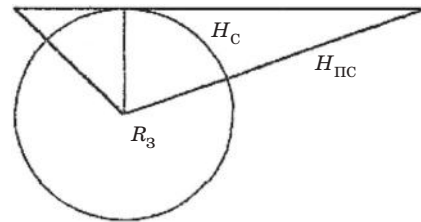


Рис. 1. Визначення дальності прямої видимості ПС

Умова прямої видимості ПС споживачем реалізується згідно з відомими співвідношеннями:

$$D_{\text{ПВ}} = D_1 + D_2, \quad D_1 = \left((R_3 + H_C)^2 - R_3^2 \right)^{1/2}, \quad D_2 = \left((R_3 + H_{\text{ПС}})^2 - R_3^2 \right)^{1/2}. \quad (3)$$

Як випливає 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 доступне навіть для наземних споживачів. Тоді дальність прямої видимості становитиме $D_{\text{ПВ}} = D_2$.

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

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

Але для стійкої роботи НАС на поверхні Землі кожний ПС має спостерігатись із Землі під певним кутом (кутом височіння) $\theta > 0$. Для СРНС цей кут становить від 5 до 15°.

Визначимо, чому ж буде дорівнювати відстань від С до ПС за умови спостережуваності ПС під кутом височіння θ (рис. 2).

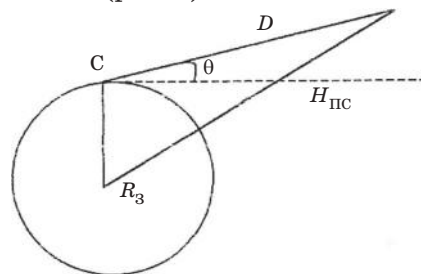


Рис. 2. Визначення дальності прямої видимості ПС з урахуванням кута височіння

Виконавши нескладні розрахунки, можна показати, що дальність прямої видимості О між С та ПС при куті місця θ становить

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

Досліджуючи значення D при різних значеннях θ , бачимо, що при $\theta = 0^\circ$ (ПС перебуває на горизонті)

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

При $\theta = 90^\circ$ (ПС перебуває в зеніті)

$$D = \frac{(R_3 + H_{\text{ПС}}) \cos(90^\circ + \arcsin 0)}{\cos 90^\circ}, \quad D = \frac{(R_3 + H_{\text{ПС}}) \cos 90^\circ}{\cos 90^\circ}. \quad (7)$$

Отже, маємо невизначеність виду $\frac{0}{0}$.

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

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

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

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

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

Очевидно, що при збільшенні $H_{\text{ПС}}$ 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 певному районі, необхідно максимально збільшувати висоту ПС.

Залежність кута θ височіння ПС, який перебуває на висоті 8 км, від геодезичної віддалі наземного С від його опорної точки L за припущення щодо відсутності рельєфу місцевості унаочнює рис. 3.

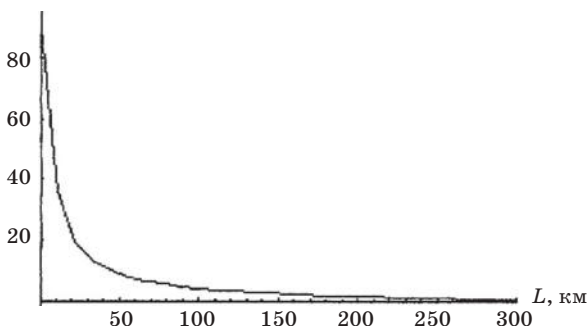


Рис. 3. Залежність кута височіння ПС від геодезичної віддалі наземного С

Як бачимо, коли 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.

Як відомо, для визначення координат за допомогою ПС РНС псевдодалекомірним способом необхідно, щоб у полі зору споживача одночасно перебували не менш як чотири ПС. Тому зони дії необхідної кількості ПС мають «накладатись» одна на одну. При розташуванні чотирьох опорних точок ПС у вигляді будь-якої чотирикутної фігури за умови однакових радіусів дії всіх ПС для того, аби площа взаємного перекриття була більша від нуля, необхідно, щоб опорні точки повітряних ПС лежали в межах кола такого самого радіуса.

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

Для спрощення розрахунків будемо розглядати лише основні правильні фігури, які утворюються при побудові чотирьох ПС — чотирикутник та трикутник із центральною точкою.

Площа $S_{\text{КВ}}$ фігури, яка утворюється в 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).

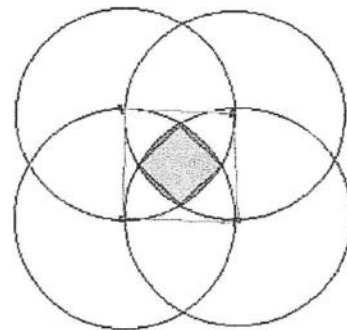


Рис. 4. Елементарна чотирикутна чарунка

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

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

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

де R — радіус зони дії одного ПС; d — відстань між опорними точками ПС елементарної чарунки; S_{\square} — площа квадрата, який утворюється в 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 — опуклого трикутника, утвореного перетином трьох кругових зон дії ПС, та кругової зони дії четвертого ПС.

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

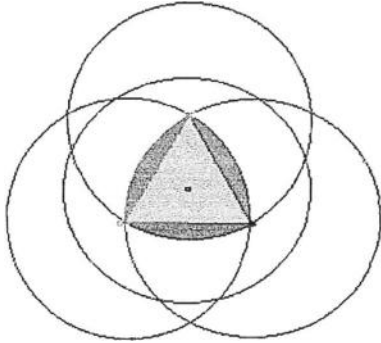


Рис. 5. Трикутна елементарна чарунка

$$S_{\text{ТР}} = S_{\Delta} + 3S_{(3)}, \quad (13)$$

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

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

де S_{Δ} — площа трикутника; $S_{(3)}$ — площа 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 суцільне, необхідно, щоб відстані між найвіддаленішими ПС у елементарній чарунці дорівнювали радіусу зони дії ПС, тобто виконувалась рівність $d = R$.

Приклади утворення суцільного РНП поєднанням елементарних чарунок наведено на рис. 6.

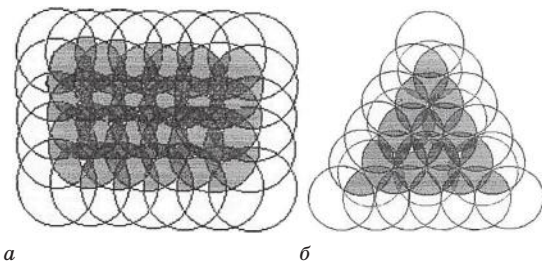


Рис. 6. Комбінація з елементарних чарунок ПС у формі квадратів (а) і трикутників (б)

Як бачимо, у такому полі існують зони чотири-, п'яти- та шестикратного перекриття зон дії окремих ПС. З метою здешевлення системи необхідно

досягати мінімуму площі зон, в яких кратність перекриття більша 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.

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 $d = R$ (довжина сторони квадрата при квадратній конфігурації елементарних чарунок), утворяться зони чотири-, п'яти та шестикратного перекриття. Якщо припустити, що в результаті протидії противника було виведено з ладу (знищено) m ПС, то площа чотирикратного перекриття зменшиться і в суцільному полі з'являться розриви. При спробі визначити своє місцезнаходження споживач, який перебуває в таких розривах, не буде спостерігати достатньої кількості ПС і сама процедура визначення стане неможливою.

Якщо місцезнаходження споживача в межах суцільного РНП апріорно невідоме, то можна вважати що С з однаковою ймовірністю може перебувати в будь-якій точці цього простору. Очевидно, що ймовірність одночасного спостереження чотирьох та більше ПС у будь-якій точці, яка перебуває в межах суцільного РНП, дорівнює 1.

Але якщо РНП стане несучільним, то і ймовірність того, що споживач у будь-якій точці зазначеного простору буде спостерігати достатню кількість ПС, зменшиться на величину, пропорційну до втраченої площі. Отже, імовірність 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.

Значення $S_{\text{ВТР}}$ та S обчислюються в кожному конкретному випадку окремо з урахуванням попередньо розглянутих положень, оскільки ці площі в загальному випадку залежать від взаємного розташування елементарних чарунок.

Висновки

1. При збільшенні НПС збільшується і загальна дальність дії ПС РНС. Отже, з метою збільшення дальності дії ПС РНС, збільшення площі покриття і, відповідно, зменшення загальної кількості ПС, необхідних для створення РНП у потрібному районі, необхідно максимально збільшувати висоту ПС.

2. Зони дії необхідної кількості ПС мають «накладатись» одна на одну. При розташуванні чотирьох опорних точок ПС у вигляді будь-якої чотирикутної фігури за умови однакових радіусів дії

всіх ПС для того, аби площа взаємного перекриття була більша від нуля, необхідно, щоб опорні точки повітряних ПС лежали в межах кола такого самого радіуса.

3. З метою спрощення розрахунків розглянемо лише основні правильні фігури, які утворюються при побудові чотирьох ПС, — чотирикутник та трикутник із центральною точкою.

4. 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 суцільне, необхідно, щоб відстані між найвіддаленішими ПС у елементарній чарунці дорівнювали радіусу зони дії ПС, тобто $d = R$.

Література

1. **Петров, Н. Н.** Системы и комплексы технических средств местоопределения подвижных объектов [Электронный ресурс] / Н. Н. Петров.— Режим доступу:

<http://st.ess.ru/redaction/index.htm>.

2. **Рокот «Чёрного Грома»: Применение RTK GPS при разработке горных месторождений** [Электронный ресурс].— Режим доступу:

www.gpsworld.com.

3. *Application of geodesy to engineering* [Электронный ресурс].— Режим доступу:

www.gfy.ku.dk.

4. *Indoor Navigation System using Pseudolite* [Электронный ресурс].— Режим доступу:

<http://gps.snu.ac.kr>.

5. **Болдырев, В. С.** Беспилотники вместо спутников / В. С. Болдырев, В. П. Заколodayжний, Б. И. Лобойко // Независимое военное обозрение.—2002.— № 23.

6. **Каримов, А. В.** В России задумались над беспилотниками / А. Каримов, В. Ильин // Независимое военное обозрение.— 2001.— № 14.

7. *Relative Positioning Using Pseudolites in the Navigation Systems Testing Laboratory at NASA's Johnson Space Center* [Электронный ресурс].— Режим доступу:

www.nstl.com.

8. **Испытания псевдоспутника прошли успешно** [Электронный ресурс].— Режим доступу:

www.nature.ru.

9. *United States Department of Defense Contract* [Электронный ресурс].— Режим доступу:

www.defenselink.mil.

10. **Шебшаевич, В. С.** Введение в теорию космической навигации / В. С. Шебшаевич.— М.: Советское радио, 1971.— 296 с.

Рецензент: доктор техн. наук, професор С. В. Козелков, Навчально-науковий інститут Телекомунікацій та інформатизації Державного університету телекомунікацій, Київ.

А. В. Шульга

СОЗДАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ СТРУКТУРЫ СЕТИ ПСЕВДОСПУТНИКОВЫХ РАДИОНАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМ

Предложены методы создания сети псевдоспутниковых радионавигационных систем (ПС РНС) 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. В отличие от СРНС максимальная дальность действия ПС ограничена. Проведенные расчеты показывают, что дальность прямой видимости объекта O между потребителем C и ПС, а также устойчивость работы НАС зависят от угла возвышения относительно поверхности Земли, т. е. каждый ПС должен наблюдаться с Земли под определенным углом. Определено, что для увеличения дальности действия ПС РНС, увеличения площади покрытия и, соответственно, уменьшения общего количества ПС, необходимых для создания РНП в требуемом районе, необходимо максимально увеличивать высоту ПС. Доказано, что для определения координат с помощью ПС РНС псевдодалномерным способом необходимо, чтобы в поле зрения потребителя одновременно находились не менее четырех ПС. Поэтому зоны действия необходимого числа ПС должны «накладываться» друг на друга.

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

O. Shulga

PSEUDOSATELLITE NAVIGATION SYSTEM NETWORK STRUCTURE CREATION AND OPTIMIZATION

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. Unlike SRNS, PS maximum range is limited. Calculations show that line of sight range O between C and PS and NAS stability depends on the elevation angle relative to Earth surface, i. e. every PS should be observed from ground at certain angle. Determined that to PS SRNS increase range, coverage increasing and, accordingly, PC total number reducing needed to build RNP in required area should be possible to increase PS height. It is proved that for positioning using PS RNS pseudorange-finder method requires that in field of consumer view at the same time there were at least four PS. Therefore range area of PS required number should be «imposed» on each other.

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