

УДК 621.396.670

Герасименко К. В. магістр. Тел.: +380 (97) 241 79 18. E-mail: c.herasymenko@gmail.com
(Державний університет телекомунікацій, м. Київ)

МОДЕЛЬ ФУНКЦІОНУВАННЯ СУПУТНИКОВОЇ РАДІОНАВІГАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ В УМОВАХ СКЛАДНОЇ РАДІОЕЛЕКТРОННОЇ ТА ЗАВАДОВОЇ ОБСТАНОВКИ

Herasymenko K. V. Model of functioning satellite radio navigation system in a complex electronic and noise conditions. The widespread use of satellite navigation systems in various areas of human activity is defined by the possibilities to meet the high requirements for accuracy and reliability of navigation definitions. Recently, however, more acute problem arises – problem of possible malfunction of the satellite radio navigation systems or limited consumer access to navigation services. The article describes approaches to the vitality and immunity assessment of radio equipment and the mathematical model of the satellite radio navigation system in a complex radio electronic and noise conditions proposed. Developed model should be used in the design and development (modernization) radio navigation systems of different basing and land-based functional additions global navigation satellite system. These will take into account the features of radio navigation systems use in electronic and fire exposure enemy. As well as these will help to assessing the quality of navigational support of interested consumers (primarily – military) by existing radio navigation systems and their functional additions because it combines the characteristics of a radio navigation support with the characteristics of opposing detection means, radio electronic suppression and fire destruction of the enemy.

Keywords: satellite navigation systems, consumer navigation equipment, interference to radio navigation signals

Герасименко К. В. Модель функціонування супутникової радіонавігаційної системи в умовах складної радіоелектронної та завадової обстановки. Широке застосування супутникових радіонавігаційних систем в різних сферах діяльності людини визначається можливостями задоволення високих вимог до точності та надійності навігаційних визначень. Однак, останнім часом все гостріше постає проблема можливості порушення функціонування супутникових радіонавігаційних систем або обмеження споживачів в доступі до радіонавігаційних послуг. В статті розглянуті підходи до оцінки живучості та завадостійкості радіотехнічних засобів та запропонована математична модель функціонування супутникової радіонавігаційної системи в умовах складної радіоелектронної та завадової обстановки.

Ключові слова: супутникові радіонавігаційні системи, навігаційна апаратура споживача, завади радіонавігаційним сигналам

Герасименко К. В. Модель функционирования спутниковой радионавигационной системы в условиях сложной радиоэлектронной и помеховой обстановки. Широкое применение спутниковых радионавигационных систем в различных сферах деятельности человека определяется возможностями удовлетворения высоких требований к точности и надежности навигационных определений. Однако в последнее время все острее встает проблема возможности нарушения функционирования спутниковых радионавигационных систем или ограничения потребителей в доступе к радионавигационным услугам. В статье рассмотрены подходы оценки живучести и помехоустойчивости радиотехнических средств и предложена математическая модель функционирования спутниковой радионавигационной системы в условиях сложной радиоэлектронной и помеховой обстановки.

Ключевые слова: спутниковые радионавигационные системы, навигационная аппаратура потребителя, помехи радионавигационным сигналам.

Вступ. Сучасний етап розвитку людства характеризується поступовим переходом від постіндустріального до інформаційного суспільства, характерною ознакою якого є стрімкий розвиток інформаційних технологій та їх широке впровадження у всі сфери людської діяльності. Інформаційна інфраструктура держави стає життєво важливою для її існування з усіма від цього похідними: вона стає об'єктом першого удару і потребує для свого захисту збалансованої державної політики в інформаційному просторі. До критичної інформаційної інфраструктури належать, у першу чергу, системи управління, канали зв'язку, навігація, розвідка, системи наведення та інші інформаційні елементи, насамперед, у військовій сфері [1].

Постановка завдання в загальному вигляді. Широке застосування супутникових радіонавігаційних систем (СРНС) в різних сферах діяльності людини визначається можливостями задоволення високих вимог до точності та надійності навігаційних визначень. Однак, останнім часом все гостріше постає проблема можливості порушення функціонування СРНС або обмеження споживачів в доступі до радіонавігаційних послуг. Це може призвести не лише до погіршення точності навігаційних визначень, зменшення робочих зон системи, порушення обслуговування в певних районах, але й до катастрофічних наслідків – порушення функціонування системи навігаційного забезпечення на значних територіях протягом тривалих періодів часу. В контексті цього, зростаюча у всьому світі залежність збройних сил від інформації супутникових радіонавігаційних систем робить механізм порушення навігаційних сигналів потужною зброєю в сучасній збройній боротьбі [2-4].

Аналіз основних публікацій. Дослідженню питань можливості обмеження доступу до радіонавігаційних послуг СРНС та можливим напрямкам вирішення цієї проблеми присвячений ряд робіт [3-10]. У відповідності з ними, одним з перспективних напрямків забезпечення безперервного та надійного доступу споживачів до навігаційної інформації є комплексне використання інформації супутникових радіонавігаційних систем та наземних засобів координатно-часового та навігаційного забезпечення, а одним з основних методів боротьби з перешкодами є просторова адаптивна фільтрація, тобто формування нулів в діаграмі спрямованості антени навігаційної апаратури споживача (НАС) в напрямках приходу перешкод та наступної просторово-часової адаптивної обробки прийнятих навігаційних сигналів.

Виходячи з цього, **метою статті** є аналіз існуючих підходів до оцінки живучості та перешкодостійкості радіотехнічних засобів та обґрунтування математичної моделі функціонування супутникової радіонавігаційної системи в умовах впливу навмисних перешкод.

Основний матеріал. Враховуючи характер сучасної збройної боротьби, СРНС буде функціонувати в жорстких умовах сучасного високотехнологічного бою, якому притаманне широке застосування засобів виявлення та ураження (подавлення) радіотехнічних засобів.

У загальному випадку надійність системи навігаційного забезпечення (СНЗ) залежить від ряду складових. Слід зазначити, що показники технічної надійності елементів та надійності, що зумовлена характером поширення радіохвиль, рівнем природних перешкод і дальністю радіовидимості не залежать від впливу противника, в той час як імовірності ухвалення рішення на радіоелектронне подавлення (РЕП) $P_{РЕП}$ СРНС та вогневе ураження (ВУ) $P_{ВУ}$ або радіоелектронне подавлення елементів наземної локальної РНС (радіонавігаційних точок) будуть взаємозалежними.

Імовірність ухвалення рішення на РЕП визначається за наступним співвідношенням:

$$P_{РЕП} = P_{розкр.} \cdot P_{д.РЕП} \cdot P_{ВП}, \quad (1)$$

де $P_{розкр.}$ - імовірність розкриття системи навігаційного забезпечення;

$P_{д.РЕП}$ - імовірність прийняття рішення про доцільність радіоелектронного подавлення;

$P_{ВП}$ - імовірність наявності вільного передавача перешкод.

У загальному випадку імовірність розкриття радіовипромінюючої системи можна визначити як

$$P_{розкр.} = P_{ЕМД} \cdot P_{ft}, \quad (2)$$

де $P_{ЕМД}$ - імовірність електромагнітної доступності

$$P_{ЕМД} = P \left[\frac{P_c}{P_n} \geq \left(\frac{P_c}{P_n} \right)_{пор.} \right], \quad (3)$$

P_c / P_n - відношення сигнал/завада;

P_{f_t} - імовірність виявлення випромінювання за частотою та часом;

$$P_{f_t} = 1 - \left(\frac{\overline{\tau_0}}{\tau_1 + \tau_0} \cdot e^{-\frac{(F_c + F_{pnp})/\gamma_T}{\tau_0}} \right)^n, \quad (4)$$

де $\overline{\tau_1}$, $\overline{\tau_0}$ – середній час випромінювання та невипромінювання РНІ радіонавігаційною точкою;

n – число циклів розвідки;

F_c , F_{pnp} – ширина спектру радіонавігаційного сигналу та ширина смуги пропускання розвідприймача відповідно;

γ_T – швидкість сканування засобу розвідки по частоті.

Величина відношення P_c / P_n (3) є функцією технічних характеристик засобів виявлення та параметрів зовнішнього середовища.

Оскільки апіорно точні відомості про ці характеристики та параметри відсутні і при розрахунках використовуються їх наближені значення, то відношення P_c / P_n є випадковою величиною. Тому про наявність чи відсутність електромагнітної доступності до випромінюючих елементів РНС можливо стверджувати лише з деякою імовірністю

$$P_{EMД} = \int_{(P_c / P_n)_{пор.}}^{\infty} W(P_c / P_n) d(P_c / P_n), \quad (5)$$

де $W(P_c / P_n)$ – щільність розподілу ймовірностей відношення P_c / P_n на вході приймача засобу виявлення джерела радіовипромінювання.

Для ухвалення рішення на вогневе ураження необхідно знати також координати елементів радіонавігаційної системи, тому імовірність ухвалення рішення на вогневе ураження можна представити у наступному вигляді:

$$P_{BV} = P_{розкр.} \cdot P_{МП} \cdot P_{Д.ВУ} \cdot P_{ВВУ}, \quad (6)$$

де $P_{розкр.}$ – імовірність розкриття системи навігаційного забезпечення;

$P_{МП}$ – імовірність виявлення місцеположення РНТ;

$P_{Д.ВУ}$ – імовірність прийняття рішення про доцільність ВУ;

$P_{ВВУ}$ – імовірність наявності вільних засобів вогневого ураження.

У свою чергу, імовірність визначення місцеположення РНТ знаходиться за формулою

$$P_{МП} = P_{кп} \cdot P_{пел2} \cdot P_{ор}, \quad (7)$$

де $P_{кп}$ – імовірність надходження команди на пеленгування;

$P_{пел2}$ – імовірність зняття пеленгів на випромінюючу РНТ не менше ніж двома пеленгаторами;

$P_{ор}$ – імовірність отримання результатів пеленгування на командному пункті.

Імовірність зняття пеленгів на випромінюючу радіонавігаційну точку не менше ніж k пеленгаторами мережі, що складається з m пеленгаторів, дорівнює [11, 12]

$$P_{m,k} = \sum_{i=k(\geq 2)}^m c_m^i (P_{\text{пел}}^{(1)})^i \cdot (1 - P_{\text{пел}}^{(1)})^{m-i}, \quad (8)$$

де $P_{\text{пел}}^{(1)}$ – імовірність зняття пеленгу на радіонавігаційну точку одним пеленгатором.

Якщо імовірності розкриття радіонавігаційної системи та визначення місцеположення її елементів значною мірою залежатимуть від технічних характеристик засобів виявлення, то імовірності прийняття рішення про доцільність радіоелектронного подавлення та вогневого ураження будуть суб'єктивними факторами і залежатимуть від умов обстановки, що склалася. Імовірність наявності вільного передавача перешкод чи засобу вогневого ураження буде залежати від співвідношення сил і засобів сторін та напруженості бойових дій.

Враховуючи вищесказане, перейдемо до визначення імовірності функціонування радіонавігаційної системи в умовах радіоелектронного та вогневого впливу противника. У загальному вигляді (у випадку довільної залежності між $P_{\text{РЕП}}$ та $P_{\text{ВУ}}$) імовірність функціонування РНС P_{Φ} , як імовірність повної групи несумісних подій, матиме вигляд [11-12]

$$P_{\Phi} = P_T \cdot P_{\text{ВУ}} \cdot P_{\Phi\text{ВУ}} \cdot (P_{\text{РЕП/ВУ}} \cdot P_{\Phi\text{РЕП}} + (1 - P_{\text{РЕП/ВУ}}) \cdot P_3) + P_T \cdot (1 - P_{\text{ВУ}}) \times \\ \times (P_{\text{РЕП/ВУ}} \cdot P_{\Phi\text{РЕП}} + (1 - P_{\text{РЕП/ВУ}}) \cdot P_3), \quad (9)$$

де P_T - технічна надійність системи;

$P_{\Phi\text{ВУ}}$ - імовірність функціонування системи в умовах вогневого ураження;

$P_{\text{РЕП/ВУ}}$ - відносна імовірність прийняття рішення на РЕП при наявності рішення на ВУ;

$P_{\Phi\text{РЕП}}$ - імовірність функціонування системи в умовах радіоелектронного подавлення;

$1 - P_{\text{РЕП/ВУ}}$ - імовірність неприйняття рішення на РЕП при прийнятті рішення на ВУ;

P_3 - надійність навігаційного забезпечення, що визначається характером поширення радіохвиль;

$1 - P_{\text{ВУ}}$ - імовірність неприйняття рішення противником на ВУ;

$P_{\text{РЕП/ВУ}}$ - відносна імовірність прийняття рішення на РЕП при відсутності рішення на ВУ;

$1 - P_{\text{РЕП/ВУ}}$ - імовірність одночасного неприйняття противником рішення на РЕП та неприйняття рішення на ВУ.

Зі співвідношення (9) можна отримати часткові співвідношення для імовірності функціонування РНС в деяких типових ситуаціях.

Оскільки знищувати об'єкти в космічному просторі теоретично можуть лише декілька країн, які в той же час є власниками СРНС, імовірність фізичного знищення СРНС будемо вважати рівною нулю. В цьому випадку ($P_{\text{ВУ}} = 0$, $P_{\text{РЕП}} \geq 0$), маємо

$$P_{\Phi} = P_T \cdot (P_{\text{РЕП}} \cdot P_{\Phi\text{РЕП}} + (1 - P_{\text{РЕП}}) \cdot P_3), \quad (10)$$

Висновки. Розроблену модель доцільно використовувати при проектуванні та розробці (модернізації) радіонавігаційних систем різного базування та наземних функціональних доповнень глобальної навігаційної супутникової системи для урахування особливостей їх застосування в умовах радіоелектронного та вогневого впливу противника, а також при оцінці якості навігаційного забезпечення зацікавлених споживачів (в першу чергу - військових) існуючими радіонавігаційними системами та їх функціональними доповненнями, оскільки в ній поєднуються характеристики засобів радіонавігаційного забезпечення з характеристиками протидіючих їм засобів виявлення, радіоелектронного подавлення та вогневого ураження противника.

Література

1. Пермяков О. Ю. Інформаційні технології та сучасна збройна боротьба / О. Ю. Пермяков, А. І. Сбітнєв. – Луганськ : Знання, 2008. – 204 с.
2. Кашаев И. А. Уязвимость систем аэронавигационного обеспечения / И. А. Кашаев, С. И. Смык, А. К. Шейгас // Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних Сил. – 2008. – №1(16). – С. 15–19.
3. Alison Brown, Dale Reynolds, Capt. Darren Roberts, Major Steve Serie. Jammer and interference location system – design and initial test results // Proceedings of the ION GPS '99, 14-17 Sept. 1999, Nashville, TN.
4. Кравченко Ю. В. Концепція синтезу локальної багатопозиційної радіонавігаційної системи / Ю. В. Кравченко, О. В. Лаврінчук, Р. М. Залужний // Системи озброєння і військова техніка. – 2009. – №2(18). – С.75-78.
5. Бутенко В. В. Проблемы совместного функционирования радиоэлектронных систем наземного и космического базирования / В. В. Бутенко. – Москва : СИП РИА, 2004. – 384 с.
6. Кравченко Ю. В. Теория синтеза псевдоспутниковых радионавигационных систем / Ю. В. Кравченко. – Київ : НАОУ, 2007. – 210 с.
7. Naylor J., Sorber S. Advanced GPS Anti-Jam Technology. Lockheed Martin / G-Star Lockheed Martin's. Washington, D. C.: National Press Club, 2000. – P. 1–11.
8. Писарев С. Б. Возможности пространственной режекции помех при приеме сигналов глобальных навигационных спутниковых систем / С. Б. Писарев, А. В. Немов, А. М. Иванов, М. М. Фуксов // Известия вузов России. Радиоэлектроника. – 2003. – Вып. 2. – С. 61-72.
9. Кашеев А. А. Оценка эффективности подавления сигналов спутниковых радионавигационных систем преднамеренными помехами / А. А. Кашеев, В. И. Кошелев // Журнал радиоэлектроники. – 2012. - № 7. – С. 1–12.
10. Немов А. В. Адаптивный пространственно-поляризационный прием сигналов глобальных навигационных спутниковых систем / А. В. Немов, Д. Ю. Тюфтяков // Известия вузов России. Радиоэлектроника. – 2011. – Вып. 5. – С. 57-64.
11. Вентцель Е. С. Введение в исследование операций / Е. С. Вентцель. – Москва : Сов. Радио, 1964. – 388 с.
12. Вентцель Е. С. Теория вероятностей / Е. С. Вентцель. – Москва : Наука, 1964. – 576 с.

Дата надходження в редакцію: 04.08.2015 р.

Рецензент: д.т.н., проф. Ю. В. Кравченко