

Козелков С. В., Коршун Н. В. *Державний університет телекомунікацій, Київ*

МЕТОД ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ НАВЕДЕННЯ АНТЕННИХ ПРИСТРОЇВ РАДІОТЕХНІЧНОГО КОМПЛЕКСУ УПРАВЛІННЯ КОСМІЧНИМИ АПАРАТАМИ

Виконано аналіз впливу нелінійних характеристик радіотехнічного комплексу на завадостійкість та пропускну спроможність наземного комплексу управління космічним апаратом. Показано, що розділення режимів роботи антенних систем на захоплення і автосупровід підвищує точність наведення радіотехнічного комплексу. У випадку перспективної супутникової радіолінії кращим є адаптивний варіант організації НВЧ та ВВЧ каналу передачі з компенсацією завад.

Ключові слова: радіотехнічний комплекс, космічний апарат, діаграма спрямованості, пропускну спроможність, помилка наведення, адаптивна система.

Kozelkov S. V., Korshun N. V. *State University of Telecommunications, Kyiv*

METHOD OF RAISING ACCURACY GUIDING THE ANTENNA DEVICE OF THE RADIOENGINEERING CONTROL COMPLEX OF THE SPACECRAFT

In order to determine the requirements for the accuracy of antenna guidance and the probability of errors in receiving microwave and VHF radio signals, the analysis of the influence of nonlinear characteristics of the radio engineering complex on the impedance and throughput of the space vehicle control complex is of particular importance. In this case, the separation of the modes of operation of antenna systems for capture and automatic space tracking will improve the accuracy of the guidance of the radio engineering complex. In the case of a promising satellite radio station, the adaptive variant of the organization of microwave and VHF channel transmission with the compensation of noise caused by nonlinear distortions is the best. To meet the requirements, it is expedient to use the auto-propagation mode with the switching of receivers of the antenna tracking system in the mode of "capture" and "detecting" wide bandwidth, and in the "escort" mode with a narrow bandwidth. An adaptive synchronization algorithm for connecting radio lines is proposed. The generalized functional diagram of the synchronization system for realization of this algorithm is shown. The effectiveness of application of the proposed adaptive algorithm of synchronous radio link is estimated. As a criterion, an integral quality indicator is used – the effective energy price of the unit of information transmission, which allows simultaneous and compact accounting of both precision and dynamic characteristics as well as the energy parameters of synchronization systems. A generalized functional diagram of an adaptive synchronization system that implements the specified algorithm is presented.

Keywords: directional diagram, radioengineering control complex, spacecraft, bandwidth, guidance error, adaptive system.

Козелков С. В., Коршун Н. В. *Государственный университет телекоммуникаций, Киев*

МЕТОД ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ НАВЕДЕНИЯ АНТЕННЫХ УСТРОЙСТВ РАДИОТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА УПРАВЛЕНИЯ КОСМИЧЕСКИМИ АПАРАТАМИ

Выполнен анализ влияния нелинейных характеристик радиотехнического комплекса на помехоустойчивость и пропускную способность наземного комплекса управления космическим аппаратом. Показано, что разделение режимов работы антенных систем на захват и автосопровождение повышает точность наведения радиотехнического комплекса. В случае перспективной спутниковой радиолинии предпочтительным является адаптивный вариант организации СВЧ и ВВЧ канала передачи с компенсацией помех.

Ключевые слова: радиотехнический комплекс, космический аппарат, диаграмма направленности, пропускная способность, ошибка наведения, адаптивная система.

1. Вступ і постановка задачі дослідження

Супутникові системи зв'язку на сьогоднішній день є одним з ключових видів систем передачі інформації. Їх інтенсивний розвиток направлений на підвищення пропускної спроможності. Вирішення даної задачі може забезпечуватись завдяки використанню сантиметрового і міліметрового діапазонів довжин хвиль. При цьому виникає необхідність підвищення точності наведення антенних пристроїв радіотехнічного комплексу управління космічними апаратами (КА). Загальною оцінкою якості роботи будь-якої системи наведення антен служить показник точності їх наведення.

Одне з основних завдань, яке виникає в процесі проектування системи наведення антен, полягає в забезпеченні високої точності наведення в умовах впливу великої кількості випадкових збурень і завад. Відомо, що необхідна точність наведення визначається шириною головної пелюстки діаграми спрямованості (ДС) антени і залежить від співвідношення діаметра розкриття антени і довжини використовуваної радіохвилі [1]. При цьому прийнято вважати, що допустима помилка наведення зазвичай не повинна перевищувати десятих часток ширини ДС (ШДС) за рівнем половинної потужності і визначається виразами (1) і (2):

$$\Delta_{\text{доп}} = (0,1 \div 0,25)\Theta_{0,5}, \quad (1)$$

де $\Theta_{0,5}$ – ШДС за рівнем половинної потужності, що дорівнює

$$\Theta'_{0,5} = \frac{4,2 \cdot 10^3 \lambda}{B}, \quad (2)$$

де $4,2 \cdot 10^3$ – коефіцієнт для параболічної антени [2];

λ – робоча довжина хвилі;

B – діаметр дзеркала.

2. Алгоритм наведення антенних систем

Аналіз точності наведення антенних систем показує, що підвищення динамічної точності системи наведення антен вимагає розширення смуги, а це суперечить вимозі до завадостійкості радіотехнічних систем (РТС). Розширення смуги системи наведення антен понад певне значення призводить не до збільшення, а до зменшення точності наведення, оскільки в цьому випадку зростають помилки, викликані різного роду шумами. Однак звуження смуги системи наведення антен може виявитися недоцільним через часті зриви наведення. Для задоволення цим суперечливим вимогам є доцільним використання режиму автосупроводу з перемиканням приймачів слідкуючої системи антени в режимі "захоплення" і "виявлення" широкою смугою пропускання, а в режимі "супроводу" – вузькою смугою пропускання. Тоді алгоритм наведення антен буде наступний.

На початковому етапі "виявлення" і "захоплення" при входженні в зв'язок з космічним апаратом використовується приймач для пошуку широкої ДС, використовується НВЧ діапазон. У разі виявлення та сталого радіоприйому сигналів з КА відбувається підстроювання широкої ДС на максимум з подальшим переходом в режим "супровід". На другому етапі включається приймач для підстроювання на максимум вузької ДС (ВВЧ діапазон), входження в режим "супровід" вузької ДС. У разі зриву наведення, тобто зниження рівня сигналу нижче порогового значення, переходимо до першого етапу.

Порівняємо відношення ШДС при використанні діапазону НВЧ та ВВЧ [2]: $\frac{\Theta_{0,5\text{ВВЧ}}}{\Theta_{0,5\text{НВЧ}}} = 10$.

Отже, застосування даного методу дозволить збільшити точність наведення антенного пристрою на порядок

Відомо, що з підвищенням швидкості передачі інформації по радіоканалах реальна ефективність застосування відомих методів вирішення протиріччя між точнісними і динамічними характеристиками систем синхронізації ліній зв'язку швидко знижується [1]. Зокрема, необхідне для високошвидкісних радіоліній зв'язку підвищення швидкодії систем синхронізації зазвичай забезпечується шляхом збільшення надмірності за потужністю

синхросигналу (у порівнянні з усталеним режимом), що призводить до погіршення енергетичних характеристик даних радіоліній. Тому актуальною є розробка методу підвищення інтегральної ефективності важливого і перспективного класу систем синхронізації ліній зв'язку за інформаційним сигналом.

Відзначимо насамперед ту обставину, що інформація, прийнята при наявності порушень синхронізації, зазнає істотних спотворень і, як правило, незворотно втрачається. Більш того, поява (внаслідок "зриву" тактової та/або високочастотної синхронізації) довгої серії помилкових символів може в ряді випадків призводити до порушень циклової (кадрової) синхронізації і, отже, до довготривалих перерв в зв'язку. Звідси випливає висновок про доцільність розробки і застосування адаптивних алгоритмів організації процесу синхронізації, які передбачають використання повної потужності інформаційного сигналу для прискореного встановлення (відновлення) стану синхронізму з метою скорочення необоротних втрат корисної інформації та підвищення надійності зв'язку. З огляду на специфіку приймачів НВЧ діапазону хвиль, де рівень шумів визначається переважно місцевими апаратурними флуктуаціями, доцільно змінювати енергетику "синхроканалу" при переходах від режиму захоплення до режиму утримання та назад. При цьому формальний математичний запис шуканого адаптивного алгоритму синхронізації може бути представлений в наступному вигляді:

$$\left. \begin{aligned} U_{\text{вихфДз}} < U_n &\rightarrow \left(\begin{array}{l} "C_T" \div 1/\beta; "I" \div (\beta - 1)/\beta \\ "C_G" \div 0 \end{array} \right), \\ U_{\text{вихфДз}} \geq U_n &\rightarrow \left(\begin{array}{l} "C_T" \div 1/\beta; "C_G" \div (\beta - 1)/\beta \\ "I" \div 0 \end{array} \right), \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

де $U_{\text{вихфДз}}$ – напруга на виході внутрішнього кільця точної синхронізації;

U_n – порогове значення $U_{\text{вихфДз}}$, що характеризує наявність (при $U_{\text{вихфДз}} < U_n$) або відсутність (при $U_{\text{вихфДз}} \geq U_n$) стану точного синхронізму, тобто режиму точного утримання у внутрішньому кільці;

"I", "C_T", "C_G" – позначення інформаційного каналу, а також точного і грубого "синхроканалів", відповідно.

Верхній рядок у круглих дужках виразу (3) вказує робочі (в даний момент часу) канали, а нижній рядок означає непрацюючий в цей час канал приймача сигналів.

Величина, відокремлена в (3) знаком (\div), характеризує енергетику (тобто відведену частину повної потужності інформаційного сигналу) відповідного каналу приймача сигналів.

При цьому прискорення процесів встановлення (і відновлення) стану синхронізму забезпечується шляхом використання в грубому "синхроканалі" приймача тієї частки $(\beta - 1)/\beta$ потужності сигналу, яка в стаціонарному стані синхронізму служить для виділення в інформаційному каналі приймача корисних повідомлень. Таким чином, інформаційний канал і грубий "синхроканал" приймача одночасно функціонувати не можуть, в той час як його точний "синхроканал" працює постійно – для забезпечення процесів вилучення інформації і з метою контролю наявності стану синхронізму (в режимі утримання), або тільки для вирішення останнього завдання (в режимі захоплення).

3. Ефективність адаптивного алгоритму

Оцінимо ефективність застосування запропонованого адаптивного алгоритму синхронізації зв'язкової радіолінії. В якості критерію використаємо інтегральний показник якості – ефективну енергетичну ціну передачі одиниці інформації, що дозволяє здійснити одночасний і компактний облік як точнісних і динамічних характеристик, так і енергетичних

параметрів систем синхронізації. Вважаючи при цьому заданими якість синхронізації лінії та комплексу ліній зв'язку, запишемо такий вираз для визначення величини $E_{\text{ЕФ}}$:

$$E_{\text{ЕФ}} = \frac{T_c}{T_c - T_{\Sigma} (1 + k_H^{-1})} E_I + q k_p E_C, \quad (4)$$

де E_I та E_C – реальна енергетична ціна передачі одиниці відповідно корисної інформації та синхроінформації, причому відмінність величин E_I та E_C обумовлена специфікою інформаційного каналу та "синхроканалу";

T_c – тривалість сеансу зв'язку;

T_{Σ} – середній час вхождення в синхронізм;

q – коефіцієнт, що дорівнює відношенню переданого за сеанс зв'язку обсягу синхроінформації до обсягу корисної інформації, переданого за той же інтервал часу (в якості мажоритарної оцінки значення величини q може служити відношення пропускної здатності "синхроканалу" та інформаційного каналу з урахуванням ступеня їх практичного використання);

k_p – коефіцієнт, що характеризує "запас" за потужністю синхросигналу в порівнянні з мінімально необхідним для заданої якості синхронізації рівнем (даний запас може створюватись, наприклад, для підвищення функціональної надійності синхронізації; з метою забезпечення прискореного входження в синхронізм та ін.), $k_p \geq 1$;

k_H – коефіцієнт, що характеризує надійність синхронізації і дорівнює середньому числу зривів синхронізації за сеанс зв'язку.

Використовуючи формулу (4), можна показати, що підвищення інтегральної ефективності систем синхронізації забезпечується шляхом зменшення витрат часу T_{Σ} на встановлення (і відновлення) синхронізму за рахунок застосування для цих цілей енергії інформаційного сигналу, практично непотрібного під час перехідних процесів в зазначених вище системах. При цьому одночасно знижується величина необхідної надмірності по енергії синхросигналу для усталених періодів функціонування систем синхронізації, тобто $k_p \downarrow$ (а в ряді випадків повністю усувається необхідність введення цієї надмірності, тобто $k_p \rightarrow k_{pmin}=1$), що також забезпечує додатковий вииграш в ефективності даних систем.

4. Схемна реалізація алгоритму наведення антенних систем

На рис. 1 представлена узагальнена функціональна схема адаптивної системи синхронізації, що реалізує вказаний вище алгоритм (3).

На рисунку прийняті такі позначення: ПВСС – пристрій виділення синхросигналу; УП – узгоджуючий пристрій; ФД – фазовий детектор; ФНЧ – фільтр нижніх частот; ПНЧ – підсилювач низької частоти; ППС – підсилювач постійного струму; КС – комутатор сигналів; П – підсилювач; ГКН – генератор, керований напругою; ГПС – генератор пошукового сигналу; ІЗ – індикатор захоплення; ДП – дільник потужності; К – ключ; СП – синхронний приймач; підрядкові символи "г" і "т" позначають належність відповідного функціонального елемента до "грубого" (зовнішнього видкодуючого) або до "точного" (внутрішнього інерційного) кільця системи.

Зовнішнє і внутрішнє кільця синхронізації зазвичай будуються на базі схем фазового автопідстроювання (ФАП). При цьому наявність фільтра (ФНЧг), а в ряді випадків і підсилювача (ПНЧг), для зовнішнього швидкокодуючого кільця ФАП не є принципово необхідними. Додаткові можливості вирішення протиріччя між точнісними і динамічними характеристиками пропонованої адаптивної системи синхронізації пов'язані з введенням в її зовнішнє кільце додаткової схеми пошуку – див. позначені штриховими лініями елементи і зв'язки.

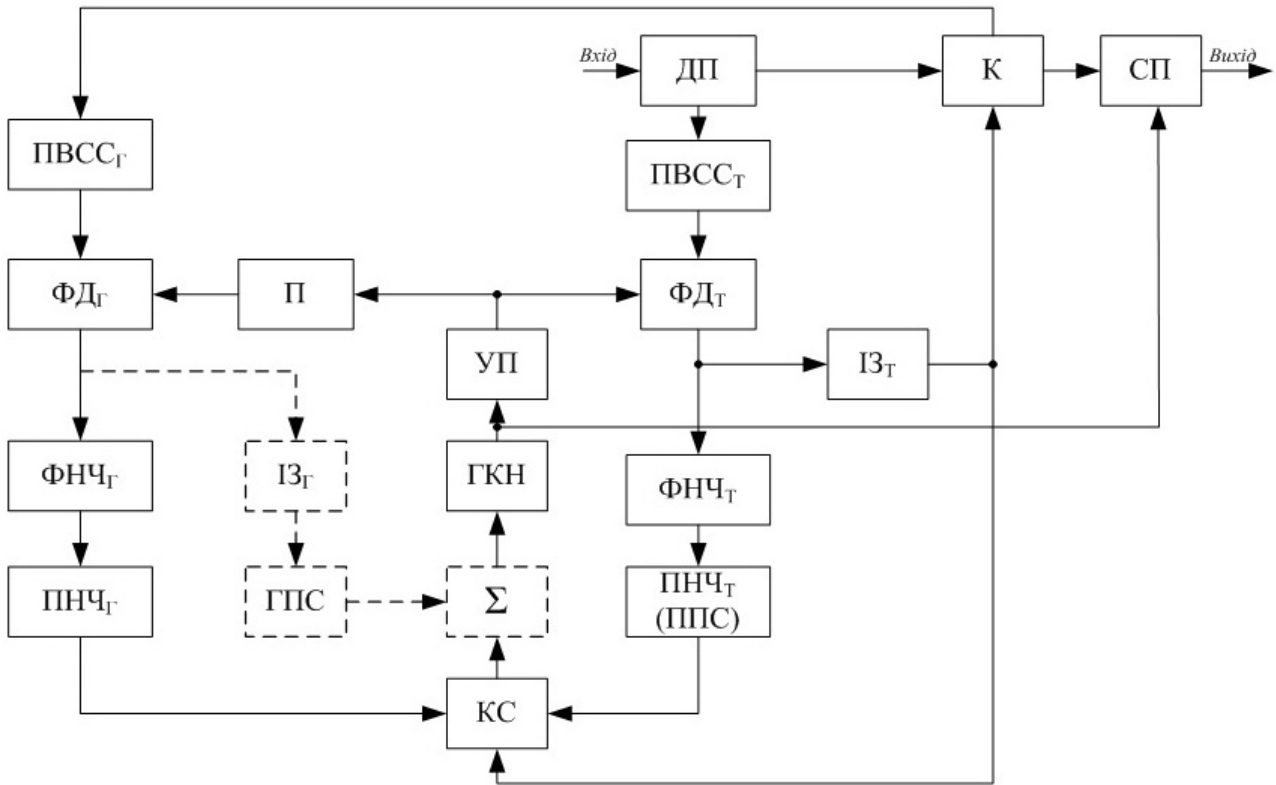


Рис. 1. Узагальнена функціональна схема адаптивної системи синхронізації

Оцінимо реальну ефективність застосування пропонованої адаптивної системи синхронізації. Застосування для цієї мети виразу (4) передбачає визначення величин T_{Σ} та k_p , загальні формули для знаходження яких при відсутності (*) або наявності (#) схеми пошуку в зовнішньому кільці ФАП мають відповідно такий вигляд:

$$T_{\Sigma}^* = T_{f_1}^* + T_{\varphi_1}^* + T_{\varphi}^2 = \frac{0,875Y_1^*}{\Delta f_{ш1}^*} + \frac{\ln(2d_1^*)}{\Delta f_{ш1}^*} + \frac{1}{d_1^*} \cdot \frac{\ln(2d_2)}{\Delta f_{ш2}} \quad (5)$$

$$k_p^* = \frac{L_2^*}{d_2} = \frac{L_1^* \Delta f_{ш1}^*}{\alpha_2 \Delta f_{ш2}} = \frac{1}{(\beta - 1)} = \frac{\alpha_1^*}{\alpha_2} \cdot \frac{2}{\sqrt{Y_1^*}} \cdot \frac{\Delta f_{вих}}{\Delta f_{ш2}} \cdot \frac{1}{(\beta - 1)} \quad (6)$$

$$T_{\Sigma}^{\#} = T_{пошук_1}^{\#} + T_{f_1}^{\#} + T_{\varphi_1}^{\#} + T_{\varphi_2}^{\#} = \frac{\Delta f_{вих}}{[\Delta f_{ш1}^{\#}]^2 \cdot \left[1 - \frac{1}{\sqrt{L_1^*}}\right]} + \frac{0,875Y_1^{\#}}{\Delta f_{ш1}^{\#}} + \frac{\ln(2\alpha_1^{\#})}{\Delta f_{ш1}^{\#}} + \frac{1}{\alpha_1^{\#}} \cdot \frac{\ln(2\alpha_2)}{\Delta f_{ш2}} \quad (7)$$

$$k_p^{\#} = \frac{\alpha_2^{\#}}{\alpha_2} = \frac{\alpha_1^{\#}}{\alpha_2} \cdot \frac{\Delta f_{ш1}^{\#}}{\Delta f_{ш2}} \cdot \frac{1}{(\beta - 1)} = \frac{\alpha_1^{\#}}{\alpha_2} \cdot \frac{2}{g_1(\beta - 1)} \cdot \frac{1}{\sqrt{Y_1^*}} \cdot \frac{\Delta f_{вих}}{\Delta f_{ш2}} \quad (8)$$

де $T_{пошук}$ – час пошуку синхросигналу по частоті у вихідній області невизначеності $\Delta f_{вих}$, величина якої визначається якістю синхронізації комплексу радіоліній (тобто точністю і періодичністю зведення частот синхрогенератора і стабільністю частоти останніх) [1,2, 5];

T_f і T_φ – час "затягування" відповідно частоти і фази в кільці ФАП;

Υ – коефіцієнт пропорційно-інтегруючого фільтра ($\Upsilon \geq 1$);

$\Delta f_{\text{ш}}$ – шумова смуга кільця ФАП;

α – відношення потужності синхросигналу до потужності шуму в шумовій смузі $\Delta f_{\text{ш}}$ кільця ФАП;

підрядкові символи означають відношення позначеної величини (параметра, характеристики) відповідно до зовнішнього (першого) або до внутрішнього (другого) кільця ФАП пропонованої системи синхронізації;

g_1 – коефіцієнт, який визначає співвідношення між областю пошуку (невизначеності) синхросигналу по частоті $\Delta f_{\text{вих}}$ і зоною захоплення («затягування») частоти $\Delta f_{\text{зах1}}$ зовнішнього кільця ФАП, причому $g_1 = \frac{\Delta f_{\text{вих}}}{\Delta f_{\text{зах1}}} = \frac{2\Delta f_{\text{вих}}}{\Delta f_{\text{ш1}}\sqrt{\Upsilon_1}} \geq 1$ та $\Delta f_{\text{зах1}} = \frac{\Delta f_{\text{ш}}}{2}\sqrt{\Upsilon} = \frac{\Delta f_{\text{ут}}}{\sqrt{\Upsilon}}$;

$\Delta f_{\text{ут}}$ – смуга утримання ФАП.

Відзначимо, що у виразах (5) і (7) при визначенні величин T_f і T_φ передбачалося, що відношення сигнал/шум α в шумовій смузі відповідного кільця ФАП перевищує значення 10^2 . Якщо $\alpha < 10^2$, то в даних формулах необхідно враховувати ефекти "уповільнення" процесів затягування частоти і фази синхросигналу. Зокрема, при $\alpha = 10$ має $T_{f(\alpha=10)} = 2T_{f(\alpha \geq 10^2)}$ та $T_{\varphi(\alpha=10)} = 2T_{\varphi(\alpha \geq 10^2)}$.

В цілому необхідно відзначити, що застосування пропонованої адаптивної НВЧ системи дозволяє в $(\beta - 1)$ раз підвищити енергетику "синхроканалу" в режимі встановлення (відновлення) стану синхронізму. Це в свою чергу забезпечує можливість прискорення пошуку по частоті в $(\beta - 1)^2$ разів і зменшує час затягування частоти в зовнішньому кільці системи в $(\beta - 1)$ разів. Відповідно, знижуються втрати корисної інформації і зменшується ефективна енергетична ціна її передачі. Таким чином, практичне використання описаного адаптивного методу синхронізації дозволяє істотно підвищити ефективність функціонування систем зв'язку і забезпечує можливість подальшого підвищення швидкості передачі інформації з апіорно заданою вірністю без зниження при цьому точності синхронізації і без введення надмірності в енергетиці "синхроканалу".

5. Висновки

Для перспективних космічних систем доцільно використовувати адаптивну схему наведення антенних систем РТС, в якій використовуються кілька радіоприймальних пристроїв. Застосування даної схеми наведення має перевагу в РТС, що вимагають ефективного застосування антенних систем, зокрема, при проведенні траєкторних вимірювань, при здійсненні входження в радіозв'язок з КА; в разі, коли місцезнаходження КА не може бути точно визначене внаслідок його переміщення по орбіті, при роботі на радіолініях з низькими енергетичними показниками, при наявності в радіоканалі шумів і завмирань.

Список використаної літератури

1. Покрас А. М. Системы наведения антенн земных станций спутниковой связи / А. М. Покрас, В. М. Цирлин, Г. Н. Кудеяров. – Москва: Связь, 1978. – 151 с.
2. Козелков С. В. Функционирование системы контроля и анализа космической обстановки в условиях однопунктной технологии / С. В. Козелков. – Киев: НАОУ, ЦНИИ НиУ, 2007. – 232 с.

3. Рачинский А. П. Методика наведения антенных устройств радиотехнических систем управления космическими аппаратами при переходе области зенита / А. П. Рачинский // Системы обработки информации. – 2003. – №3. – С.179-184.

4. Козелков С. В. Підвищення завадостійкості контрольно-коригувальних станцій супутникових радіонавігаційних систем з урахуванням впливу дестабілізуючих факторів / С. В. Козелков, Н. В. Коршун, В. Ф. Заїка, М. М. Степанов // Зв'язок. – 2015. – №3. – С.3-6.

5. Козелков С. В. Аналіз умов розповсюдження радіохвиль для забезпечення технологій 4G та 5G / С. В. Козелков, Н. В. Коршун // Телекомунікаційні та інформаційні технології. – 2017. – №4. – С.5-10.

References (MLA)

1. Pokras A. M., Tsirlin V. M., and Kudeyarov G. N. *Systems of Guidance Antennas of Earth Stations of Satellite Communication*. Moscow: Svyaz', 1978. Print.

2. Kozelkov S. V. *Functioning of the System of Control and Analysis of the Space Environment under the Conditions of One-Point Technology*. Kyiv: NAOU, Central Scientific Research Institute of NIU, 2007. Print.

3. Rachinsky A. P. "Method of Guidance of Antenna Devices of Radio Engineering Systems of Control by Spacecraft in the Transition of the Zenith Region." *Systemy Obrobky Informatsii* 3 (2003): 179-184. Print.

4. Kozelkov S.V., Korshun N. V., Zaika V. F., and Stepanov M. M. "Improvement of Noise Immunity of Control and Correction Stations of Satellite Radionavigation Systems Taking into Account the Influence of Destabilizing Factors." *Zviazok* 3 (2015): 3-6. Print.

5. Kozelkov S. V., and Korshun N. V. "Analysis of the Conditions for the Propagation of Radio Waves to Provide Technologies 4G and 5G." *Telekomunikatsiini ta informatsiini tekhnolohii* 4 (2017): 5-10. Print.

Автори статті

Козелков Сергій Вікторович – доктор технічних наук, директор Навчально-наукового інституту телекомунікацій та інформатизації, Державний університет телекомунікацій, Київ. Тел. +380 (44) 249 2926. E-mail: nmiti_dut@ukr.net.

Коршун Наталія Володимирівна – кандидат технічних наук, декан факультету телекомунікацій, Державний університет телекомунікацій, Київ. Тел. +38(093)603-90-64. E-mail: natalie_korshun@ukr.net

Authors of the article

Kozelkov Serhiy Viktorovych – doctor of sciences (technical), director of the Educational-Scientific Institute of Telecommunications and Informatization, State University of Telecommunications, Kyiv. Phone: +380 (93) 542 27 73. E-mail: nmiti_dut@ukr.net.

Korshun Nataliia Volodymyrivna – candidate of sciences (technical), dean of the Telecommunications Faculty, State University of Telecommunications, Kyiv. Phone: +38(093)603-90-64. E-mail: natalie_korshun@ukr.net

Дата надходження
в редакцію: 11.03.2018 р.

Рецензент:
доктор технічних наук, професор Л. Н. Беркман
Державний університет телекомунікацій, м. Київ,