

В. О. ПУЛЯЄВ, Л. Я. ЄМЕЛЬЯНОВ, Є. В. РОГОЖКІН

ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ РОЗРАХУНКУ ОРДИНАТ АКФ СИГНАЛУ РОЗСІЯННЯ

Наведено результат моделювання двох складових автокореляційної функції (АКФ), які відображають статистичні характеристики некогерентного розсіяння, що розраховуються за допомогою основного (косинусного) та ортогонального (синусного) каналів системи кореляційної обробки радару. Продемонстровано алгоритм обчислень АКФ, коли залучається апаратура, де в наявності є два паралельно працюючих ортогональних канали зі своїми незалежними підсилювальними елементами. Показано, що є різні варіанти синхронізації паралельно працюючих ортогональних каналів. В першому з них вхідний сигнал в одному із каналів затримується на чверть періоду проміжної частоти, а в іншому – використовуються різні серії тактування АЦП. В цих серіях положення імпульсів відрізняється, а саме – вони затримані по відношенню один до одного на чверть періоду сигналу на проміжній частоті. Запропоновано зменшити похибки, які виникають в результаті неідентичності технічних характеристик цих двох квадратурних каналів обробки сигналу. Розглянуто нову структурну схему багатоканального корелятора, який одночасно розраховує як косинусну, так і синусну складові автокореляційної функції сигналу розсіяння, причому сигнал до нього надходить тільки через один канал приймача і один АЦП. Також запропоновано збільшити частоту перетворення сигналу в цифрову форму, щоб досягти значно більшу щільність розташування ординат автокореляційної функції вздовж шкали затримок. Як наслідок, результати розрахунку параметрів іоносферної плазми, що визначаються по формі АКФ, будуть мати ще й підвищену статистичну точність обчислень. Для запропонованого варіанту отримання квадратурних складових АКФ запропоновано модифікований вираз для розрахунку значень радіальної швидкості руху іоносферної плазми.

Ключові слова: сигнал розсіяння, автокореляційна функція, багатоканальний корелятор.

В. А. ПУЛЯЕВ, Л. Я. ЕМЕЛЬЯНОВ, Е. В. РОГОЖКИН

ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ РАСЧЕТА ОРДИНАТ АКФ СИГНАЛА РАССЕЯНИЯ

Приведен результат моделирования двух составляющих автокорреляционной функции (АКФ), которые отражают статистические характеристики некогерентного рассеяния, что рассчитываются с помощью основного (косинусного) и ортогонального (синусного) каналов системы корреляционной обработки радару. Продемонстрировано алгоритм вычисления АКФ, когда привлекается аппаратура, где в наличии есть два параллельно работающих ортогональных канала со своими независимыми усилительными элементами. Показано, что есть разные варианты синхронизации параллельно работающих ортогональных каналов. В первом из них входной сигнал в одном из каналов задерживается на четверть периода промежуточной частоты, а в другом – используются различные серии тактирования АЦП. В этих сериях положения импульсов отличаются, а именно – они задержаны по отношению друг к другу на четверть периода сигнала на промежуточной частоте. Предложено уменьшить погрешности, которые возникают в результате неидентичности технических характеристик этих двух квадратурных каналов обработки сигнала. Рассмотрена новая структурная схема многоканального коррелятора, который одновременно рассчитывает как косинусную, так и синусную составляющие автокорреляционной функции сигнала рассеяния, причем сигнал к нему поступает только через один канал приемника и один АЦП. Также предложено увеличить частоту преобразования сигнала в цифровую форму, чтобы достичь значительно большей плотности расположения ординат автокорреляционной функции вдоль шкалы задержек. Как следствие, результаты расчета параметров ионосферной плазмы, определяемые по форме АКФ, будут иметь еще и повышенную статистическую точность вычислений. Для предложенного варианта получения квадратурных составляющих АКФ предложено модифицированное выражение для расчета значений радиальной скорости движения ионосферной плазмы.

Ключевые слова: сигнал рассеяния, автокорреляционная функция, многоканальный коррелятор.

V. A. PULYAYEV, L. YA. EMEL'YANOV, E. V. ROGOZH'KIN

IMPROVING THE ACCURACY OF CALCULATION OF THE SCATTER SIGNAL ACF ORDINATES

The result of the simulation of two components of the autocorrelation function (ACF), which reflect the statistical characteristics of incoherent scattering, which are calculated using the main (cosine) and orthogonal (sine) channels of the radar correlation processing system, is given. The algorithm for computing the ACF is demonstrated when the equipment is involved, where there are two parallelly operating orthogonal channels with their own independent amplifying elements. It is shown that there are different options for synchronizing parallel orthogonal channels. In the first of them, the input signal in one of the channels is delayed by a quarter of the intermediate frequency period, and in the other, various series of ADC clocking are used. In these series, the positions of the pulses differ, namely, they are delayed with respect to each other by a quarter of the signal period at the intermediate frequency. It is proposed to reduce the errors that arise as a result of non-identical technical characteristics of these two quadrature signal processing channels. A new structural diagram of the multichannel correlator is considered, which simultaneously calculates both the cosine and the sine components of the autocorrelation function of the scattering signal. The signal comes to it only through one receiver channel and one ADC. It is also proposed to increase the frequency of signal conversion to digital form in order to achieve a much higher density of the ordinates of the autocorrelation function along the delay scale. As a result, the results of the calculation of the parameters of the ionospheric plasma, determined by the form of the ACF, will also have an increased statistical accuracy of the calculations. For the proposed option to obtain quadrature components of the ACF, a modified expression has been proposed for calculating the values of the radial velocity of the ionospheric plasma.

Keywords: scatter signal, autocorrelation function, multi-correlator.

Вступ. Відомо, що від точності обчислень ординат автокореляційної функції (АКФ) сигналу некогерентного розсіяння (НР) залежить достовірність подальших розрахунків параметрів іоносферної плазми (кінетичних температур іонів і електронів, швидкості руху плазми, іонного складу тощо) [1].

АКФ обчислюють для ряду ділянок радіолокаційної розгортки дальності, а для цього для кожної з них необхідно отримати декілька десятків його цифрових відліків шляхом аналого-цифрового перетворення прийнятого сигналу.

© В. О. Пуляєв, Л. Я. Ємельянов, Є. В. Рогожкін, 2018

Мета роботи – зменшення похибки обчислення ординат АКФ за рахунок того, що в теперішній час є можливість для значного збільшення кількості відліків сигналу. Для цього ж удосконалюється структура кореляційного пристрою радару НР та усуваються похибки, що пов'язані з проходженням сигналу некогерентного розсіяння через квадратурні канали приймача й АЦП з неідентичними технічними характеристиками.

Аналіз стану питання. Параметри іоносферної плазми, зокрема її швидкість, розраховуються при використанні двох складових АКФ [2, 3]. Для визначення ортогональних ординат кореляційних функцій сигналу розсіяння в радіоприймальному тракці виділяються ортогональні сигнали в двох квадратурних каналах шляхом затримки одного з сигналів на проміжній частоті відносно іншого та подальшого синхронного детектування з перенесенням спектрів в область низьких частот або використовується високочастотне заповнення АКФ, якщо здійснюється обробка сигналу на проміжній частоті.

У всіх випадках сигнали з виходів квадратурних каналів трансформуються у цифровий код за допомогою двох АЦП, що синхронізуються імпульсами тактування з частотою f_{τ} . В системі обробки сигнали стробуються на протязі радіолокаційної розгортки, що задає положення ділянок з об'ємами розсіяння згідно радіолокаційній затримці t . Це відповідає тому, що ділянки вздовж променя радару мають центри на висотах $h = ct/2$, де c – швидкість світла.

Для однієї із таких ділянок на рис. 1 наведено результат моделювання двох складових АКФ, які відображають характер некогерентного розсіяння для основного (косинусного) (рис. 1а) та ортогонального (синусного) (рис. 1б) каналів системи кореляційної обробки. Сигнал $U(t)$ на проміжній частоті $f_{\text{пр}}$ одночасно проходить через ці канали. Косинусна та синусна складові $R_0(\tau) \cos(2\pi f_{\text{пр}} \tau)$ і $R_0(\tau) \sin(2\pi f_{\text{пр}} \tau)$ демонструють заповнення АКФ (з внесенням деякої доплерівської добавки частоти сигналу, яка відповідає відмінній від нуля швидкості руху плазми), а $R_0(\tau)$ є їх узагальнюючою обвідною.

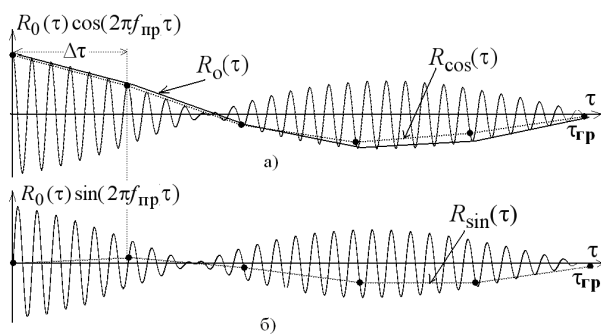


Рис. 1. Ортогональні складові АКФ сигналу розсіяння та їх цифрові значення на виході корелятора (точки)

Як результат роботи корелятора є ортогональні складові АКФ $R_{\text{cos}}(\tau)$ і $R_{\text{sin}}(\tau)$, що використовуються для подальших обчислень параметрів іоносферної плазми. Тут $\tau = k \cdot \Delta\tau$ – дискретні аргументи кореляційної функції, де $\Delta\tau$ – крок по кореляційній затримці, величина якої забезпечує синхронну вибірку відліків сигналу.

Ця покрокова затримка $\Delta\tau$ зазвичай є значно більшою за період сигналу на проміжній частоті. Так, радар НР Інституту іоносфери при зондуванні іоносфери в метровому діапазоні радіохвиль (робоча частота радару $f_0 = 158$ МГц) до останнього часу використовував крок по затримці $\Delta\tau = 30$ мкс, що на інтервалі затримок від нуля до заданого граничного значення (до появи другого нуля АКФ) $\tau_{\text{гр}} = 600$ мкс дозволяло у реальному часі отримати лише $N = \tau_{\text{гр}} / \Delta\tau = 20$ ординат АКФ [4]. Це давало можливість охопити найбільш інформативну частину АКФ на інтервалі затримок від 0 до $\tau_{\text{гр}}$. Раніше отримати ординати більш щільно було недосяжно із-за недостатньої швидкодії обчислювальних систем. Збільшення щільності є необхідним для досліджень верхньої частини іоносфери, в районі висот 1000 км і вище, оскільки в цьому випадку форма АКФ поступово звужується (рис. 2). В результаті цього інформативна частина АКФ представляється дуже малою кількістю ординат, що в процесі їх подальшого використання призводить до значних похибок.

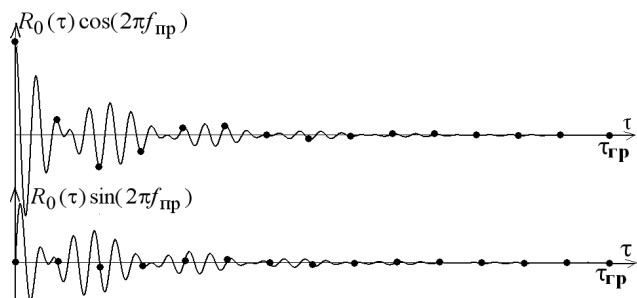


Рис. 2. Звуження форми АКФ сигналу розсіяння для випадку досліджень верхньої іоносфери

В цілому, отримання синусної складової стало можливим за рахунок зсуву сигналу у другому каналі на 90° . Результат об'єднання таких квадратурних компонент дозволяє для випадку, коли у прийнятому сигналі мають місце доплерівські добавки частоти [3], для кожної ділянки на висоті h отримати модуль незалежної від цієї добавки форми обвідної АКФ сигналу розсіяння за виразом

$$|R_0(k \cdot \Delta\tau, h)| = \sqrt{R_{\text{cos}}^2(k \cdot \Delta\tau, h) + R_{\text{sin}}^2(k \cdot \Delta\tau, h)}, \quad (1)$$

де $k = 0, 1, \dots, N$.

Ця обвідна використовується радаром НР для обчислень статистичних параметрів плазми. В той же час саме цей варіант, коли в наявності є дві складові

АКФ, отримані на зрушених на чверть періоду сигналах на проміжній частоті, дає можливість розрахувати, як було сказано вище, ще й швидкість $V_p(h)$ іонізованих часток плазми у радіальному напрямку.

З метою реалізації даного алгоритму обчислень залучається апаратура, в якій в наявності є два паралельно працюючих ортогональних канали, причому в одному з них сигнал затримується на чверть періоду проміжної частоти. Робота їх вихідних АЦП, де сигнал отримує цифровий вигляд та з яких подається до каналів корелятора, синхронізується одним і тим же сигналом тактування $U_T(t)$ [4].

Є й інший варіант реалізації апаратури, згідно якому аналогова частина у другому каналі відсутня, а на його АЦП подається сигнал з того ж першого каналу. При цьому у процес синхронізації цих АЦП закладена відмінність. Суть її в тому, що використовуються дві різні серії тактування, причому в одній з них імпульси затримані по відношенню до імпульсів другої серії на чверть періоду сигналу на проміжній частоті.

До недоліків цих варіантів обробки відноситься те, що використовуються як різні аналогові канали, так і різні АЦП. Але суть в тому, що кожен з них має свої незалежні підсилювальні каскади. Як результат – корисний сигнал проходить через два паралельних тракту, для яких практично неможливо підтримувати у часі повну ідентичність технічних характеристик. А, оскільки доплерівські зсуви, що оцінюються, дуже малі (тисячні долі відсотка від ширини спектру сигналу розсіяння), то подальше сумісне використання таких неузгоджених компонент АКФ є

слабим місцем у розрахунку швидкості руху іоносферної плазми.

Рішення задачі. В основу функціонування нової структури корелятора поставлено задачу з використання тільки одного каналу радіоприймача і одного АЦП, який буде працювати при збільшеній швидкості цифрового перетворення сигналу за рахунок зменшення періоду слідування тактових імпульсів. Така модернізація апаратури та алгоритму її роботи дозволяє впровадити більш якісний розрахунок параметрів плазми.

Аналіз та перші напрацювання показали, що в теперішній час такий пристрій по отриманню косинусних та синусних складових АКФ можна реалізувати, причому з достатньою кількістю паралельних кореляційних каналів, які будуть в змозі використовувати спільний АЦП та видавати результати в реальному часі.

В цілому, новий варіант визначення висотного розподілу параметрів іоносфери використовує радіопередавач радара з імпульсним зондуванням іоносфери на несучій частоті f_0 , радіоприймальний пристрій, який за рахунок супергетеродинного перетворення частоти переносить прийнятий сигнал до значень $U(t)$ на проміжній частоті $f_{пр}$, та один аналого-цифровий перетворювач на виході радіоприймача. А для розрахунку ординат АКФ має функціонувати багатоканальний корелятор паралельної дії. Запропонована структурна схема такого корелятора [5, 6] зображена на рис. 3.

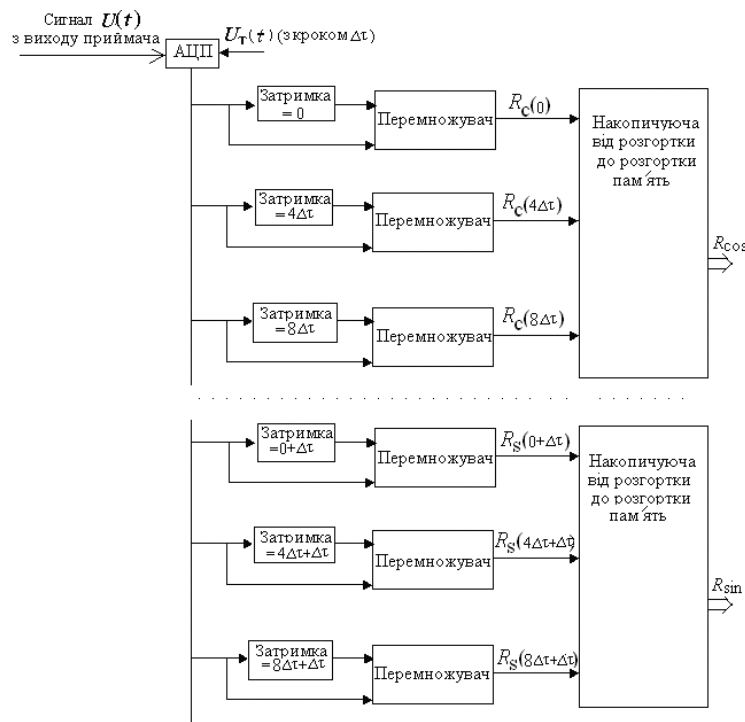


Рис. 3. Схема корелятора для одночасного отримання синусних та косинусних значень ординат АКФ

В цьому кореляторі при статистичному, від розгортки до розгортки, накопиченні для виділених ділянок можуть розраховуватися перші (косинусні) складові кореляційної функції згідно з виразом

$$R_{\cos}(k \cdot 4\Delta\tau, h) = \overline{U(t) \cdot U(t + k \cdot 4\Delta\tau)} \quad (2)$$

та другі (синусні) складові АКФ прийнятого сигналу, що розраховуються за допомогою даних з того ж самого АЦП загального каналу за виразом

$$R_{\sin}(k \cdot 4\Delta\tau + \Delta\tau, h) = \overline{U(t) \cdot U(t + k \cdot 4\Delta\tau + \Delta\tau)}. \quad (3)$$

Особливістю є те, що для функціонування такого режиму період слідування $\Delta\tau$ тактових імпульсів $U_T(t)$ по відношенню до проміжної частоти необхідно підтримувати згідно умови

$$\Delta\tau = \frac{1}{4f_{\text{пр}}} \quad (4)$$

При цьому для каналів корелятора необхідно встановити значення кроку по кореляційній затримці, кратній $4\Delta\tau$. Це все забезпечить режим синхронної вибірки на сигналі $U(t)$, але при такому підході кількість розрахованих ординат АКФ збільшиться до величини $N = \tau_{\text{гр}} / 4\Delta\tau$.

Цей варіант отримання збільшеної кількості ординат для двох складових АКФ [7] демонструється на рис. 4, де по відношенню до кожного періоду проміжної частоти присутні чотири ординати АКФ.

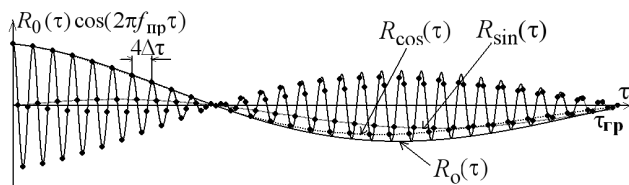


Рис. 4. Розрахунок ординат АКФ для випадку отримання на періоді сигналу проміжної частоти 4 його відліків (точки)

Для запропонованого варіанту розрахунок висотного розподілу значення радіальної швидкості руху іоносферної плазми проводиться при використанні виразу

$$V_p(h) = -\frac{c}{4\pi N f_0} \cdot \sum_{k=1}^N \left[\frac{1}{k \cdot 4\Delta\tau} \cdot \arctg \frac{R_{\sin}(k \cdot 4\Delta\tau + \Delta\tau, h)}{R_{\cos}(k \cdot 4\Delta\tau, h)} \right]$$

Для підтвердження позитивного результату у випадку вище приведеної апаратної модернізації на рис. 5 демонструються два варіанти цифрових значень сигналу розсіяння, отриманих радаром НР Інституту іоносфери при звичайному ($\Delta\tau=30$ мкс, 200 відліків на розгортці) та скороченому ($\Delta\tau=0,25$ мкс, 24000 відліків на розгортці) періодах слідування тактових імпульсів АЦП.

На рис. 6 наведено результати розрахунку висотного розподілу 10 ординат огинаючої АКФ при обробці двох типів сигналів з рис. 5. Як можна бачити, гладкість ліній у першому випадку задовольнить

дослідників лише до висоти 500 км, а у другому – навіть понад 700 км.

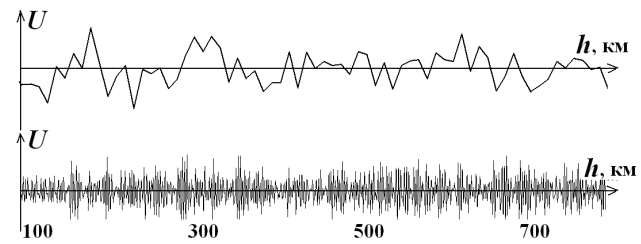


Рис. 5. Отриманий результат цифрового перетворення сигналу при періоді тактування АЦП 30 мкс (верх) та 0,25 мкс (низ)

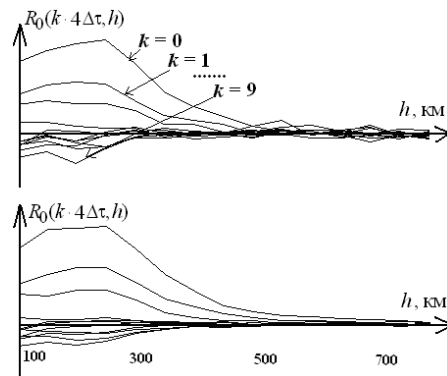


Рис. 6. Результат розрахунку ординат АКФ для двох масивів з рис. 5

Можливість реалізації запропонованого швидкодіючого корелятора підтверджується тим фактом, що в теперішній час промисловість випускає сучасні цифрові радіокомпоненти, наприклад, модуль E20-10 – швидкісний 14-розрядний АЦП, що забезпечує безперервну обробку даних на частотах до 10 МГц. Сприяють цьому і сучасні комп'ютерні системи, які, виконуючи роль системи накопичення та усереднення даних, дозволяють видавати результати в режимі реального часу для випадку збільшеної кількості кореляційних каналів.

Висновки. В статті наведено структурну схему корелятора, який розраховує як косинусну, так і синусну складові АКФ сигналу розсіяння, що приймається та перетворюється одним каналом приймача та АЦП. Позитивний результат у запропонованому варіанті є у зменшенні похибок, що пов'язані з можливою неідентичністю технічних характеристик двох каналів обробки сигналу, які раніше залучалися для отримання квадратурних складових АКФ. Крім того, через збільшену частоту перетворення сигналу у цифрову форму досягнуто значно більшу щільність розташування ординат АКФ на шкалі затримок, внаслідок чого результати розрахунку параметрів іоносферної плазми, які визначаються за формою АКФ, мають ще й підвищену статистичну точність обчислень.

Список літератури

1. Farley D. T. Incoherent scatter correlation function measurements / D.T. Farley. – Radio Science, – 1969, V. 4, №. 10 – P. 935–953.
2. Пуляев В. А. Определение параметров ионосферы методом некогерентного рассеяния радиоволн / В. А. Пуляев, Д. А. Дзюбанов, И. Ф. Домнин. – Х.: НТУ «ХПИ», 2011. – 240 с.
3. Yemelyanov L. Ya. Radio physical observations of plasma drift velocities in the ionosphere near the maximum of solar cycle 24 // Telecommunications and Radio Engineering. – 2015. – V. 74, No 20. – P. 1841–1855.
4. Пуляев В. О. Обчислювальні процедури при аналізі некогерентного розсіяння в іоносферній плазмі : монографія / В. О. Пуляев, С. В. Рогожкін, О. В. Богомаз – Х: НТУ «ХПИ», 2014. – 272 с.
5. Пуляев В. О. Спосіб визначення висотного розподілу радіальної складової швидкості руху плазми методом НР / В. О. Пуляев, Л. Я. Смельянов, С. В. Рогожкін, А. С. Мірошніков // Рішення про видачу патенту України на корисну модель за номером u201803924.
6. Rogozhkin E. V. Digital technologies for ionosphere probing by the incoherent radio-scattering technique / E. V. Rogozhkin, V. A. Pulyayev // Telecommunications and Radio Engineering. – 2017. – V. 76, Issue 6.80. – P. 551–556.
7. Пуляев В. О. Розрахунок висотного розподілу радіальної складової швидкості руху плазми методом некогерентного розсіяння / В. О. Пуляев, Л. Я. Смельянов, С. В. Рогожкін // Тези доповідей XXVI міжн. наук.-практ. конф. «Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я» (MicroCAD-2018) – Х.: НТУ «ХПИ», – 2018. Ч. III. – С. 311.
- parameters by the method of incoherent scattering of radio waves]. Kharkiv: NTU “KhPI”, 2011. 240 p.
3. Yemelyanov L. Ya. Radio physical observations of plasma drift velocities in the ionosphere near the maximum of solar cycle 24. Telecommunications and Radio Engineering. 2015, vol. 74, no 20. pp. 1841–1855.
4. Pulyayev V. O., Rogozhkin Ye. V., Bogomaz O. V. Obchyslyval'ni procedury' pry' analizi nekogerentnogo rozsiyannya v ionosfernij plazmi : monografiya [Computational procedures in the analysis of incoherent scattering in the ionospheric plasma]. Kharkiv: NTU “KhPI”, 2014, 272 p.
5. Pulyayev V. O., Yemel'yanov L. Ya., Rogozhkin Ye. V., Miroshnikov A. E. Sposib vy'znachennya vy'sotnogo rozpodilu radial'noyi skladovoyi shvy'dkosti ruxu plazmy' metodom nekogerentnogo rozsiyannya radioxvy'l' [Method for determining the height distribution of the radial component of the plasma motion velocity by the incoherent scatter technique]. Rishenn'a pro vy'dachu patentu Ukrayiny' na kory'snu model' # u201803924 [Decision on issuing a Ukrainian patent on a utility model under the number u201803924].
6. Rogozhkin E. V., Pulyayev V. A. Digital technologies for ionosphere probing by the incoherent radio-scattering technique. Telecommunications and Radio Engineering. 2017, vol. 76, issue 6.80, pp. 551–556.
7. Pulyayev V. O., Yemel'yanov L. Ya., Rogozhkin Ye. V. Rozrakhunok vysotnogo rozpodilu radial'noyi skladovoyi shvy'dkosti rukhu plazmy metodom nekoherentnoho rozsiyannya [Calculation of the height distribution of the radial component of the plasma motion velocity by the incoherent scatter technique] Tezy' dopovidej XXVI mizhn. nauk.-prakt. konf. "Informatsiyi tekhnohohiyi: nauka, tekhnika, tekhnolohiya, osvita, zdorov'ya» (MicroCAD-2018) "[Abstracts of the XXVI Intern. scientific and practical. conf. "Information technologies: science, technology, technology, education, health" (MicroCAD-2018)] Kharkiv, NTU “KhPI”, 2018, III, p. 311.

References (transliterated)

1. Farley D. T. Faraday rotation measurements using incoherent scatter. Radio Sci., 1969, vol. 4, no 2, pp. 143–152.
2. Pulyayev V. A., Dzyubanov D. A., Domnyn I. F. Opredelenye parametrov yonosfery metodom nekoherentnoho rasseyaniya radyovoln: monohrafiya [Determination of the ionosphere

Поступила (received) 01.09.2018

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Пуляев Валерій Олександрович (Pulyayev Valeriy Olexandrovych) – доктор технічних наук, професор, провідний науковий співробітник Інституту іоносфери НАН і МОН України, м. Харків; тел.: (057) 707-62-21; e-mail: pulyayev@kpi.kharkov.ua.

Смельянов Леонід Якович (Emelyanov Leonid Yakovlevych) – кандидат фізико-математичних наук, старший науковий співробітник, Інститут іоносфери НАН і МОН України, завідувач відділу, м. Харків; тел.: 706-22-87; e-mail: leonid.ya.emelyanov@gmail.com.

Рогожкін Євген Васильович (Rogozhkin Evgen Vasylyovych) – доктор фізико-математичних наук, професор, завідувач кафедри радіоелектроніки НТУ «ХПИ», м. Харків; тел.: (057) 707-62-21; e-mail: rogojkiner@ukr.net.