

ISSN 2078-9998

№ 43 2018



ВІСНИК

Національного технічного університету
«ХПІ»

№ 43 2018

Харків

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ
І НАУКИ УКРАЇНИ

MINISTRY OF EDUCATION
AND SCIENCE OF UKRAINE

Національний технічний університет
“Харківський політехнічний інститут”

National Technical University
“Kharkiv Polytechnic Institute”

**Вісник Національного
технічного університету
“ХПІ”.**
**Серія: Радіофізика та
іоносфера**

**Bulletin of the National
Technical University
“KhPI”.**
**Series: Radiophysic and
ionosphere**

№ 43 (1319) 2018

№ 43 (1319) 2018

Збірник наукових праць

Collection of Scientific papers

Видання засноване у 1961 р.

The edition was founded in 1961

Харків
НТУ “ХПІ”, 2018

Kharkiv
NTU “KhPI”, 2018

Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Радіофізика та іоносфера = Bulletin of the National Technical University “KhPI”. Series: Radiophysic and ionosphere : зб. наук. пр. / Нац. техн. ун-т «Харків. політехн. ін.-т». – Х.: НТУ ”ХПІ”, 2018. – № 43 (1319) 2018. – 56 с. – ISSN 2078-9998.

Державне видання.

Свідоцтво Держкомітету з інформаційної політики України

КВ № 5256 від 2 липня 2001 року.

Мова статей – українська, російська, англійська.

Вісник Національного технічного університету “ХПІ”. Серія: Радіофізика та іоносфера внесено до «Переліку наукових фахових видань України, в яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата наук», затвердженого наказом МОН України від 21.12.15 р. № 1328 (додаток 8).

Вісник Національного технічного університету “ХПІ”, серія “Радіофізика та іоносфера”, індексується в наукометричних базах *WorldCat* і *Google Scholar* та включений у довідник періодичних видань бази даних *Ulrich’s Periodicals Directory (New Jersey, USA)*.

Засновник	Founder
Національний технічний університет “Харківський політехнічний інститут”	National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”
Головний редактор	Editor-in-chief
Сокол Є.І., д-р техн. наук, чл.-кор. НАН України, НТУ “ХПІ”, Україна	Sokol E.I., D.Sc., member-corr. of NASU, NTU “KhPI”, Ukraine
Заст. головного редактора	Deputy editor-in-chief
Марченко А.П., д-р техн. наук, проф., НТУ “ХПІ”, Україна	Marchenko A.P., D.Sc., prof., NTU “KhPI”, Ukraine
Секретар	Secretary
Горбунов К.О., канд. техн. наук, доц., НТУ “ХПІ”, Україна	Gorbunov K.O., Ph.D., Assist. prof., NTU “KhPI”, Ukraine
Редакційна колегія серії	Editorial staff
<i>Відповідальний редактор:</i>	<i>Associate editor:</i>
Пуляєв В.О., д-р техн. наук, проф., Інститут іоносфери НАН та МОН України, Україна	Pulyaev V.O., D.Sc., prof., Institute of Ionosphere of NAS and MES of Ukraine, Ukraine
<i>Відповідальний секретар:</i>	<i>Executive secretary:</i>
Ляшенко М.В., канд. фіз.-мат. наук, с.н.с., Інститут іоносфери НАН та МОН України, Україна	Lyashenko M.V., Ph.D., senior res. off., Institute of Ionosphere of NAS and MES of Ukraine, Ukraine
<i>Члени редколегії:</i>	<i>Editorial staff members:</i>
Дзюбанов Д.А., канд. фіз.-мат. наук, с.н.с., НТУ “ХПІ”, Україна	Dzyubanov D.A., Ph.D., senior res. off., NTU “KhPI”, Ukraine
Домнін І.Ф., д-р техн. наук, проф., Інститут іоносфери НАН та МОН України, Україна	Domnin I.F., D.Sc., prof., Institute of Ionosphere of NAS and MES of Ukraine, Ukraine
Ківва Ф.В., д-р фіз.-мат. наук, проф., Інститут радіофізики та електроніки ім. О.Я. Усикова НАН України, Україна	Kivva F.V., D.Sc., prof., O.Ya. Usikov Institute for Radiophysics and Electronics of NAS of Ukraine, Ukraine
Мазманішвілі О.С., д-р фіз.-мат. наук, проф., Сумський державний університет, Україна	Mazmanishvili O.S., D.Sc., prof., Sumy State University, Ukraine
Рогожкін Є.В., д-р фіз.-мат. наук, проф., НТУ “ХПІ”, Україна	Rogozhkin E.V., D.Sc., prof., NTU “KhPI”, Ukraine
Хрипунов Г.С., д-р техн. наук, проф., НТУ “ХПІ”, Україна	Khrypunov G.S., D.Sc., prof., NTU “KhPI”, Ukraine
Чорногор Л.Ф., д-р фіз.-мат. наук, проф., Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна, Україна	Chernogor L.F., D.Sc., prof., V.N. Karazin Kharkiv National University, Ukraine
Яковенко І.В., д-р фіз.-мат. наук, проф., НДПІКІ ”Молнія” НТУ “ХПІ”, Україна	Yakovenko I.V., D.Sc., prof., Research and Design Institute ”Molniya” NTU “KhPI”, Ukraine

Рекомендовано до друку Вченою радою НТУ “ХПІ”.

Протокол № 10 від 22 грудня 2018 р.

УДК 621.391

А. В. БРЕЗГУНОВ, С. А. БРЕЗГУНОВ**ВЫЧИСЛЕНИЕ АМПЛИТУД РАДИОИМПУЛЬСОВ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ИХ ПЕРЕМНОЖЕНИЯ НА ОПОРНЫЕ СИГНАЛЫ**

Рассмотрена идея вычисления амплитуд полезного сигнала и шума на разных временных интервалах и сдвига фаз между ними. Это достигается за счёт перемножения амплитудных отсчётов (семплов) принимаемого сигнала на амплитудные отсчёты опорного сигнала, имеющего вид единицы, делённой на гармоническую функцию. В результате такого перемножения на интервале периода принимаемого сигнала, для каждого временного интервала в зависимости от сдвига фаз между опорным сигналом и шумом появляется конкретная «картинка» разных по амплитуде отсчётов. По «картинке» определяется сдвиг фаз между опорным сигналом и шумом. В зависимости от сдвига фаз вычисляется значение двух отсчётов с максимальными абсолютными значениями для варианта, соответствующего амплитуде шума равной единице. На основании измерений этих двух отсчётов определяется значение коэффициента, на который нужно умножить значение отсчётов, соответствующих амплитуде модифицированного шума равной единице. Результат перемножения отсчётов на интервале периода принимаемого сигнала на отсчёты опорного сигнала даёт постоянное значение всех отсчётов амплитуды полезного сигнала. Это позволяет, при известных значениях амплитуд модифицированного шума, вычислить амплитуду полезного сигнала.

Ключевые слова: сигнал, шум, семпл, функция, опорный сигнал, фильтрация, амплитуда, фаза сигнала.

О. В. БРЕЗГУНОВ, С. О. БРЕЗГУНОВ**ОБЧИСЛЕННЯ АМПЛІТУД РАДІОІМПУЛЬСІВ ЗА РЕЗУЛЬТАТАМИ ЇХ ПЕРЕМНОЖУВАННЯ НА ОПОРНІ СИГНАЛИ**

Розглянуто ідея обчислення амплітуд корисного сигналу і шуму на різних тимчасових інтервалах і зрушення фаз між ними. Це досягається за рахунок перемножування амплітудних відліків (семплів) сигналу, що приймається, на амплітудні відліки опорного сигналу, що має вигляд одиниці, що ділиться на гармонійну функцію. Це досягається за рахунок перемножування амплітудних відліків (семплів) сигналу, що приймається, на амплітудні відліки опорного сигналу, що має вигляд одиниці, що ділиться на гармонійну функцію. В результаті такого перемножування на інтервалі періоду сигналу, що приймається, для кожного тимчасового інтервалу залежно від зрушення фаз між опорним сигналом і шумом з'являється конкретна «картинка» різних по амплітуді відліків. По «картинці» визначається зрушення фаз між опорним сигналом і шумом. Залежно від зрушення фаз обчислюється значення двох відліків з максимальними абсолютними значеннями для варіанту, що відповідає амплітуді шуму рівній одиниці. На підставі вимірів цих двох відліків визначається значення коефіцієнта, на який треба помножити значення відліків, що відповідають амплітуді модифікованого шуму рівній одиниці. Результат перемножування відліків на інтервалі періоду сигналу, що приймається, на відліки опорного сигналу дає постійне значення усіх відліків амплітуди корисного сигналу. Це дозволяє, при відомих значеннях амплітуд модифікованого шуму, вчислити обчислювати амплітуду корисного сигналу.

Ключові слова: сигнал, шум, семпл, функція, опорний сигнал, фільтрація, амплітуда, фаза сигналу.

O. V. BREZGUNOV, S. O. BREZGUNOV**CALCULATION OF AMPLITUDES OF RADIO PULSES ON RESULTS THEIR MULTIPLYING ON SUPPORTING SIGNALS**

The idea of calculating the amplitudes of the useful signal and noise at different time intervals and the phase shift between them is considered. It is arrived at due to multiplying of the peak counting (samplers) out of the accepted signal on the peak counting out of supporting signal, having the appearance of the unit divided by a harmonic function. As a result of such multiplying on the interval of period of the accepted signal, for every temporal interval depending on the change of phases the certain "picture" of the different on amplitude counting out appears between a supporting signal and noise. On a "picture" the change of phases is determined between a supporting signal and noise. Depending on the change of phases the value of two counting out is calculated with maximal absolute values for a variant corresponding to amplitude of noise to equal unit. On the basis of measuring of these two counting out the value of coefficient, on which it is needed to increase the value of counting out, proper amplitude of the modified noise to equal unit is determined. Result of multiplying of counting out on the interval of period of the accepted signal on counting out supporting a signal gives the permanent value of all counting out of amplitude of useful signal. It allows, at the well-known values of amplitudes of the modified noise, to calculate to calculate amplitude of useful signal.

Keywords: signal, noise, sampler, filtration, supporting signal, filtration, amplitude, signal phase.

Введение. В системах связи, навигации и радиолокации широко применяются радиоимпульсы [1–10]. С целью повышения энергетической эффективности радиотехнических систем стали широко использовать цифровые методы обработки радиосигналов [1–4]. Использование средств вычислительной техники позволяет формировать и обрабатывать сигналы любой формы, если частота сигналов не превышает допустимые значения [4, 6]. Перемножение принятых сигналов $S(t)$ на опорные

сигналы $S'(t)$ (t – текущее время) в виде копий принятых сигналов давно используется в корреляционных приёмниках для повышения помехоустойчивости приёма в условиях воздействия флюктуационных гауссовых шумов каналов связи и внутренних шумов элементов тракта приёма $n(t)$ на принимаемые сигналы $S(t)$ [4, 6]. Если в качестве опорных сигналов использовать не сигналы в виде

© А.В. Брезгунов, С.А. Брезгунов, 2018

отрезков гармонических функций ($\sin \omega t$ или $\cos \omega t$), а сигналы в виде результата деления постоянного числа, например, единицы на функции, полученные в результате дискретизации гармонических функций ($1/\sin \omega t$ или $1/\cos \omega t$), то появляются дополнительные возможности по «очистке» принятого сигнала от шумов.

Цель статьи – рассмотреть идею вычисления амплитуды обрабатываемого полезного сигнала $S(t)$ и параметров шума $n(t)$, воздействующего на него, реализуя обработку результата перемножения дискретизированных функций. Перемножение функций, полученных в результате дискретизации функций типа $\{A \cdot \sin \omega t + B(t) \cdot \sin[\omega t + \Delta\omega(t)]\} \cdot 1/\sin \omega t$ даёт постоянное значение результата перемножения амплитудных отсчётов $\sin \omega t$ и $1/\sin \omega t$ и высокочастотную (негармонической формы) компоненту, что позволяет разделять полезный сигнал и шум на коротких равных интервалах времени.

Основная часть. Пусть в линию связи был передан сигнал с амплитудой A на несущей частоте ω и начальной фазой φ_0 :

$$S(t) = A \cdot \sin(\omega t + \varphi_0). \quad (1)$$

С выхода фильтров усилителя частоты радиоприёмника поступает сигнал

$$S^*(t) = A' \cdot \sin(\omega t + \varphi_0) + n(t). \quad (2)$$

После частотной фильтрации в тракте приёма флюктуационный гауссов шум $n(t)$ с центральной частотой ω изменяется по частоте в полосе пропускания Π относительно ω на величину $\pm \Delta\omega(t)$ и имеет амплитуду $B(t)$ и начальную фазу φ_{0n} ($\Delta\omega/\omega \ll 1$) [1]:

$$n(t) = B(t) \cdot \sin[\omega t + \Delta\omega(t) + \varphi_n]. \quad (3)$$

1. Рассмотрим перемножение отсчётов функций, полученных в результате дискретизации функций $1/\sin \omega t$ и $1/\cos \omega t$ (см. рис. 1), названных $SER G(\omega t)$ (то есть для функции $\nu(x)$ – это функция $SER G_\nu(x) = 1/\nu(x)$). Её амплитудные отсчёты (семплы) имеют значения, формирование которых не вызывает технических трудностей, так как они берутся в точках i , удалённых от значений ωt отсчётов $\sin \omega t_i$ (или $\cos \omega t_i$) равных нулю. Результат перемножения отсчётов $A \cdot \sin \omega t_i$ (рис. 1, а) и $SER G_S(\omega t)_i = 1/\sin \omega t_i$ (рис. 1, б), а также $A \cdot \cos \omega t_i$ (рис. 1, в) и $SER G_C(\omega t)_i = 1/\cos \omega t_i$ (рис. 1, г) за интервал одного периода колебаний для всех точек i равен постоянной величине A (высокочастотная компонента отсутствует), в данном случае $A=1$:

$$A \sin \omega t_i \cdot SER G_S(\omega t)_i = A, \quad (4)$$

$$A \cos \omega t_i \cdot SER G_C(\omega t)_i = A. \quad (5)$$

Соответственно, среднее значение результата перемножения k амплитудных отсчётов $\sin(\omega t + \Delta\varphi)_i$ и $SER G_S(\omega t)_i$ (постоянная составляющая результата перемножения при $A=1$):

$$M_{CP} = \sum_{i=1}^k \sin \omega t_i \cdot SER G_S(\omega t)_i = 1. \quad (6)$$

Рассмотрим результат перемножения отсчётов $\sin(\omega t + \Delta\varphi)_i$ и $SER G_S(\omega t)_i$ функций $\sin(\omega t + \Delta\varphi)$ и $SER G_S(\omega t)$ соответственно за интервал одного периода колебаний T при различных значениях сдвига фаз $\Delta\varphi$ между ними (рис. 2).

Из рис. 2, а видно, что при сдвиге $\Delta\varphi = 10^\circ$ среднее значение результата перемножения из k амплитудных отсчётов, взятых через 10° M_{CP} немного меньше единицы ($M_{CP} = +0,9848$), в отличие от варианта при $\Delta\varphi = 0$ (рис. 1, б) – высокочастотная компонента имеет наименьшее значение отсчёта равно $U_{MIN} = -1$, и наибольшее – $U_{MAX} = +2,9696$. При сдвиге $\Delta\varphi = 170^\circ$ (рис. 2, б) $M_{CP} = -0,9848$, $U_{MIN} = -2,9696$, а $U_{MAX} = +1$ (инверсия по амплитуде и обратный порядок следования отсчётов – конец является началом в сравнении с рис. 2, а). При сдвиге $\Delta\varphi = 50^\circ$ (рис. 2, в) $M_{CP} = +0,649$, $U_{MIN} = -8,113$, а $U_{MAX} = +9,512$. При сдвиге $\Delta\varphi = 90^\circ$ (рис. 2, г) $M_{CP} = 0$, $U_{MIN} = -11,43$, а $U_{MAX} = +11,43$.

Результаты вычисления значений перемножения амплитудных отсчётов $\sin(\omega t)_i$ и $SER G_S(\omega t)_i$ (рис. 2 и рис. 3) при различных $\Delta\varphi$ между функциями $SER G_S(\omega t)$ и $\sin(\omega t)$ показывают, что за интервал одного периода колебаний T , каждому значению $\Delta\varphi$ соответствует конкретная «картинка» отсчётов и значение постоянной составляющей $M_{CP}(\Delta\varphi)$:

- с увеличением сдвига $\Delta\varphi$ от 0° до 90° постоянная составляющая (среднее значение за период T) уменьшается от максимального положительного значения до нуля, с увеличением $\Delta\varphi$ от 90° до 180° постоянная составляющая уменьшается до максимального отрицательного значения, с увеличением $\Delta\varphi$ от 180° до 270° постоянная составляющая увеличивается до нуля, а при увеличении $\Delta\varphi$ до 360° постоянная составляющая увеличивается до максимального положительного значения;

- для каждого $\Delta\varphi$ (кроме значений $\Delta\varphi = 0^\circ$ и $\Delta\varphi = 180^\circ$) соответствуют конкретные позиции максимального положительного и отрицательного отсчётов (семплов) на интервале периода T .

- значения максимальных положительных и отрицательных отсчётов на интервале периода T возрастают с увеличением сдвига $\Delta\varphi$;

- высокочастотная компонента отсутствует при сдвигах $\Delta\varphi = 0^\circ$ и $\Delta\varphi = 180^\circ$.

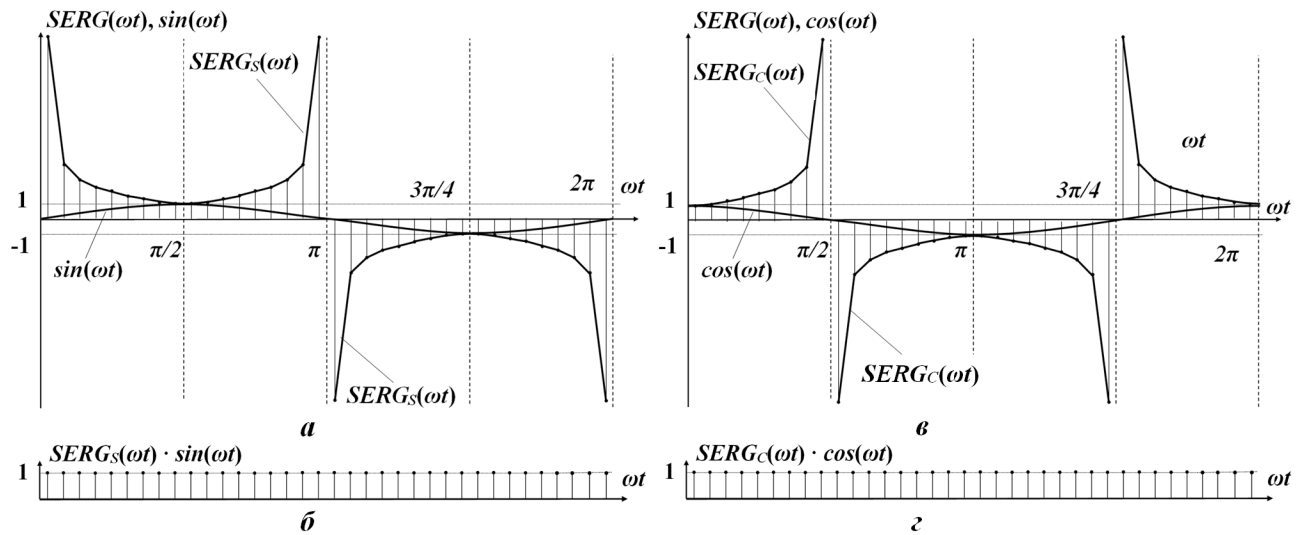


Рис. 1. Функции $\sin \omega t$ и $SERG_S(\omega t)$, $\cos \omega t$ и $SERG_C(\omega t)$, $A=1$:
 а – опорный сигнал $SERG_S(\omega t) = 1/\sin \omega t$ и переданный сигнал $\sin \omega t$;
 б – результат перемножения функций, полученных после дискретизации функций $\sin \omega t$ и $SERG_S(\omega t) = 1/\sin \omega t$;
 в – опорный сигнал $SERG_C(\omega t) = 1/\cos \omega t$ и переданный сигнал $\cos \omega t$;
 г – результат перемножения функций, полученных после дискретизации функций $\cos \omega t$ и $SERG_C(\omega t) = 1/\cos \omega t$

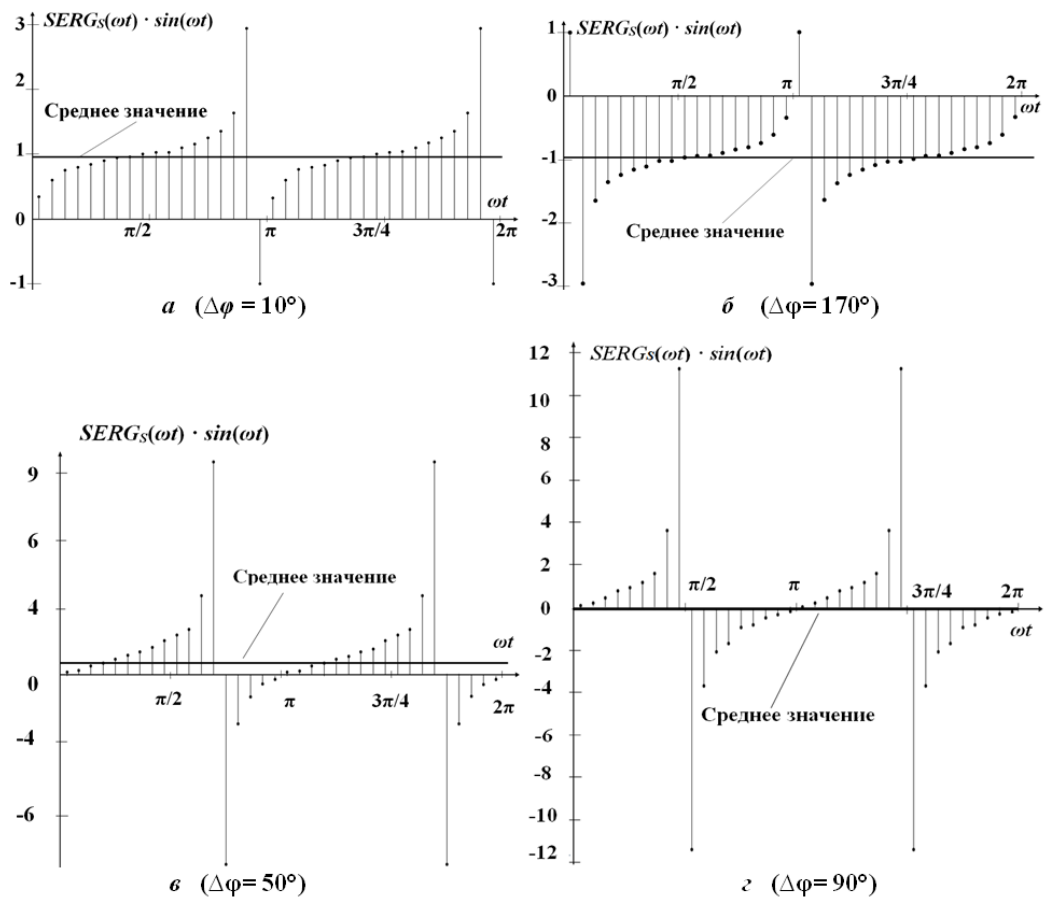


Рис. 2. Результат перемножения функций $\sin(\omega t + \Delta\phi)$ и $SERG_S(\omega t)$ за интервал одного периода колебаний T при сдвиге фаз $\Delta\phi$ между ними: а – $\Delta\phi = 10^\circ$; б – $\Delta\phi = 170^\circ$; в – $\Delta\phi = 50^\circ$; г – $\Delta\phi = 90^\circ$

При $\Delta\varphi = l \cdot 180^\circ$, ($l=0, 1, 2, \dots$), разность $|U|_{1\text{MAX}}$ и второго противоположного по знаку первому отсчёту $|U|_{2\text{MAX}}$ равна нулю: $\Delta U = |U|_{1\text{MAX}} - |U|_{2\text{MAX}} = 0$, а результат деления: $|U|_{1\text{MAX}} / |U|_{2\text{MAX}} = 1$ (рис. 3). Конкретное положение (номер i) отсчётов $|U|_{1\text{MAX}}$, $|U|_{2\text{MAX}}$ указывает на значение разности $\Delta\varphi$ (рис. 3) и M_{CP} для этой разности $\Delta\varphi$. Если в (4) $A \neq 1$, то результаты перемножения k амплитудных отсчётов $\text{Sin}(\omega t + \Delta\varphi)_i$ и $\text{SERG}_S(\omega t)_i$, а также M_{CP} необходимо умножить на постоянный коэффициент A . Тогда измеренное значение:

$$\Delta U_{\text{ИЗМ}} = A \cdot |U|_{1\text{MAX}} - A \cdot |U|_{2\text{MAX}} = A \cdot \Delta U, \quad (7)$$

а значение $A \cdot M_{\text{CP}}$ легко определяется для каждого значения $\Delta\varphi$.

Значение $A \cdot M_{\text{CP}}$ изменяется от $-A$ до $+A$ (рис. 3), поэтому выделение параметров импульса, связанных с его амплитудой, даст результат такой же, как и при корреляционной обработке [4, 6] и с помощью

интегратора не приведёт к дополнительной «очистке» принятого сигнала от шумов.

2. Рассмотрим приём в условиях воздействия флюктуационного гауссова шума $n(t)$. Полагаем, что в системе обеспечена высокоточная синхронизация по фазе опорного сигнала ($\varphi_0=0$). В качестве опорного сигнала используем сигнал, полученный путём дискретизации функции $\text{SERG}_S(\omega t) = 1/\text{Sin } \omega t$.

С учетом того, что $n(t)$ – узкополосный шум, то из-за небольшого значения набега фазы φ на малом временном интервале $\Delta t_j \rightarrow 0$ (например, $T = \Delta t_j$) при изменяющейся частоте $\omega \pm \Delta\omega(t)$ в выражении (3) будем считать, что $\pm \Delta\omega(t) \rightarrow 0$, $B(t)$ постоянна по амплитуде, т.е. $B(t) = B_j$ и учитывать лишь изменение фазы φ_n , её отличие $\Delta\varphi_{nj}$ от начальной фазы опорного сигнала $\text{SERG}_S(\omega t)$. То есть, на малом интервале времени Δt_j :

$$n(t)|_{\Delta t_j} = B_j \text{Sin}(\omega t + \Delta\varphi_{nj}). \quad (8)$$

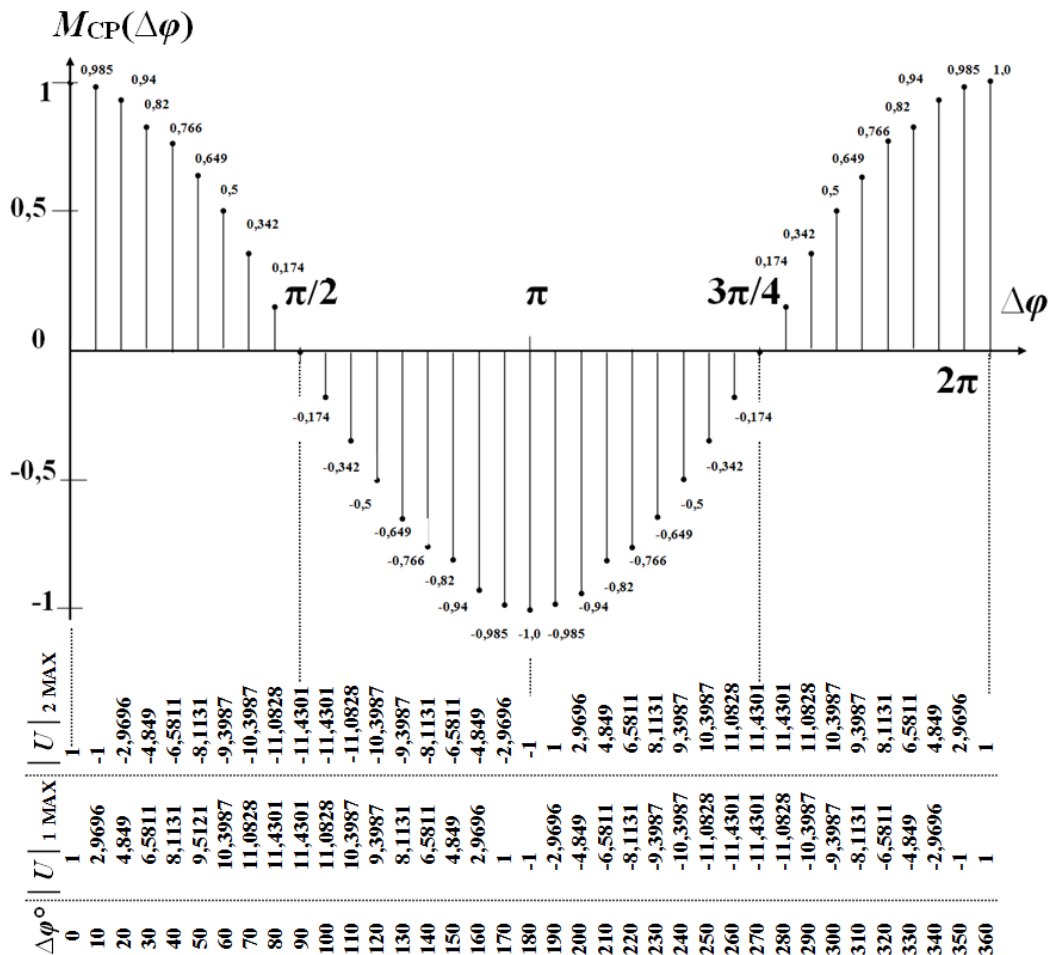


Рис. 3. Зависимость значений постоянной составляющей M_{CP} и наибольших максимальных положительных и отрицательных отсчётов первого $|U|_{1\text{MAX}}$ и второго противоположного по знаку первому отсчёту $|U|_{2\text{MAX}}$ (исключение $\Delta\varphi = l \cdot 180^\circ$, $l=0, 1, 2, \dots$) от сдвига фаз $\Delta\varphi$ между перемножаемыми функциями $\text{Sin}(\omega t + \Delta\varphi)_i$ и $\text{SERG}_S(\omega t)_i$ за интервал одного периода колебаний T

Тогда, с учётом (8) запишем выражение (2) для интервала Δt_i :

$$S^*(t_j)_{\Delta t_i} = A' \cdot \sin(\omega t) + B_j \cdot \sin(\omega t + \Delta \varphi_{nj}). \quad (9)$$

Перемножив отсчёты (семплы) сигналов $S^*(t_j)_{\Delta t_i}$ и $SERGS(\omega t)$ получим «картинку» похожую на одну из «картинок», изображённых на рис. 2, где среднее значение M_{CP}^* за Δt_i будет равно:

$$M_{CP}^*_{\Delta t_i} = A' + B_j M_{CP}', \quad (10)$$

где M_{CP}' – постоянная составляющая (среднее значение за Δt_i) результата перемножения $B_j \cdot \sin(\omega t + \Delta \varphi_{nj})$ и $SERGS(\omega t)$.

По конкретному положению (номеру i) наибольшего первого максимального по абсолютному значению отсчёта $|U|_{1MAXj}^* = A' + B_j |U|_{1MAXj}$ и второго максимального по абсолютному значению отсчёта $|U|_{2MAXj}^* = A' + B_j |U|_{2MAXj}$ определим значения разности фаз $\Delta \varphi_{nj}$ между шумом и опорным сигналом. Зная разность $\Delta \varphi_{nj}$ определим $|U|_{1MAXj}$, $|U|_{2MAXj}$ и их разность ΔU_j для варианта (рис. 3), когда постоянный коэффициент $B_j = 1$. Затем, на основании измеренных значений отсчётов $|U|_{1MAXj}^*$, $|U|_{2MAXj}^*$ вычислим $\Delta U_{ИЗМj}$:

$$\begin{aligned} \Delta U_{ИЗМj} &= (A' + B_j |U|_{1MAXj}) - (A' + B_j |U|_{2MAXj}) = \\ &= B_j \Delta U_j, \end{aligned} \quad (11)$$

и определим значение B_j :

$$B_j = \Delta U_{ИЗМj} / \Delta U_j. \quad (12)$$

Зная $|U|_{1MAXj}^*$, а также B_j и $|U|_{1MAXj}$ (или $|U|_{2MAXj}^*$, $|U|_{2MAXj}$ и B_j) находим значение A' :

$$A' = |U|_{1MAXj}^* - B_j \cdot |U|_{1MAXj} = \Delta U_{ИЗМj} / \Delta U_j. \quad (13)$$

Таким образом, для каждого интервала Δt_j можно вычислить и значение амплитуды A' принимаемого сигнала $S'(t)$ и значение амплитуды B_j воздействующего на него шума $n(t)_{\Delta t_j}$.

При использовании рассмотренного подхода в системах связи можно использовать один генератор отсчётов функций типа $1/\sin \omega t$ при использовании дискретной фазовой модуляции [3]. При использовании различных видов многофазной модуляции [3] число таких генераторов должно равняться половине от числа фаз, которые могут принимать используемые сигналы, даже если амплитуда сигналов может принимать несколько значений.

3. Если после схемы перемножения отсчётов сигналов $S^*(t)$ и $SERGS(\omega t)$ поставить фильтр высокой частоты и детектор огибающей, то детектированный высокочастотный сигнал будет характеризовать только уровень шумовой компоненты, что можно

использовать для оценки качества принимаемого сигнала [7].

Выделяя изредка возникающие отрезки после фильтра высокой частоты, на которых значение высокочастотного сигнала равно нулю, что может быть только тогда, когда фазы полезного, опорного сигнала и шума совпадают или противоположны, можно полагать, что высокоточная синхронизация по фазе опорного сигнала обеспечивается. На этих отрезках шум наиболее сильно искажает сигнал. Если такие отрезки отсутствуют на продолжительном интервале времени, то это говорит о неточности синхронизации по фазе опорного сигнала.

При амплитудах принимаемых сигналов больших, чем амплитуда шума, в моменты разности фаз $\Delta \varphi = \pm \pi/2$ (рис. 2, з) между принимаемых сигналов и опорным сигналом имеем наибольшую разность ΔU^* между наибольшим первым максимальным по абсолютному значению отсчётом и равным ему по абсолютному значению вторым отсчётом. Максимальные абсолютные значения отсчётов при этом в 11,43 больше амплитуды принимаемого сигнала («всплески» амплитуд отсчётов), что можно использовать для автоматической подстройки фазы опорного генератора, выбирая моменты, когда $S^*(t)$ имеет наибольшую амплитуду (при совпадении фаз полезного и опорного сигнала).

Выводы. 1. Перемножение функций, полученных в результате дискретизации функций типа $\{A \cdot \sin \omega t + B(t) \cdot \sin[\omega t + \Delta \omega(t)]\} \cdot 1/\sin \omega t$ даёт постоянное значение результата перемножения амплитудных отсчётов $\sin \omega t$ и $1/\sin \omega t$, и высокочастотную компоненту, что позволяет разделять полезный сигнал и шум, а также вычислить их амплитуды на коротких, равных интервалах времени.

2. Точность вычислений зависит от интервала дискретизации по времени, которая в рассматриваемом примере выбрана равной $1/36$ длительности периода сигнала, количества уровней квантования по амплитуде, соотношения мощности сигнала к мощности шума и точности синхронизации.

3. Рассмотренный метод вычисления параметров полезного сигнала и шума может быть реализован на современной элементной базе при переносе сигнала на промежуточную частоту.

4. Наибольший интерес, предложенный метод повышения соотношения P_S/P_N , может представлять для систем, использующих радиоимпульсы с прямоугольной огибающей, например, для систем связи и радиолокации с импульсной модуляцией, фазовой и квадратурной дискретной модуляцией, в научных исследованиях. Он позволяет получить «очищенный» сигнал, который далее может «очищаться» другими методами.

Список литературы

1. Вишнеvский В. М., Ляхов А. И., Портной С. Л., Шахнович И. В. *Широкополосные беспроводные сети передачи информации*. М.: Техносфера, 2005. 592 с.
2. Григорьев В. А., Лагутенко О. И., Распаев Ю. А. *Сети и системы радиодоступа*. М.: Эко-Трендз, 2005. 384 с.
3. *Защищённые радиосистемы цифровой передачи информации* / П. Н. Сердюков, А. В. Бельчиков, А. Е. Дронов и др. М.: АСТ, 2006. 403 с.
4. *Радиотехнические цепи и сигналы: Учеб. для вузов по спец. «Радиотехника»* / С. И. Баскаков. 5-е изд. М.: Высш. шк., 2005. 462 с.
5. Тихонов В. И. *Статистическая радиотехника*. М.: Радио и связь, 1982. 624 с.
6. *Основы теории информации и кодирования* / И. В. Кузьмин, В. А. Кедрус. 2-е изд. К.: Вища шк. Головное изд-во, 1986. 238 с.
7. Шувалов В. П. *Приём сигналов с оценкой их качества*. М.: Связь, 1979. 240 с.
8. Финк Л. М. *Теория передачи дискретных сообщений*. М.: Сов. радио, 1970. 727 с.
9. *Статистическая теория связи и её практические применения* / Под ред. Б. Р. Левина. М.: Связь, 1979. 288 с.
10. Варакин Л. Е. *Системы связи с шумоподобными сигналами*. М.: Радио и связь, 1985. 384 с.
2. Grigoriev V. A., Lagutenko O. I., Raspaev U. A. *Seti i sistemy radiodostupa* [Networks and systems of radioaccess]. Moscow: Eko-Trends, 2005. 384 p.
3. *Zashhishhjonnye radiosistemy cifrovoj peredachi informacii* [Protected radiosistemy of digital information transfer] / P. N. Serdukov, A. V. Belchikov, A. E. Dronov and other. Moscow: AST, 2006. 403 p.
4. *Radiotekhnicheskie cepi i signaly: Ucheb. dlja vuzov po spec. «Radiotekhnika»* [Radio Circuits and Signals: Proc. for by special institutions. "Radio engineering"] / S. I. Baskakov. Fifth edition. Moscow: High school, 2005. 462 p.
5. Tihonov V. I. *Statisticheskaja radiotekhnika* [Statistical radio engineering]. Moscow: Radio and telecommunications, 1982. 624 p.
6. *Osnovy teorii informacii i kodirovaniya* [Fundamentals of information theory and coding] / I. V. Kuzmin, V. A. Kedrus. Second edition. Kiev, High school, 1986. 238 p.
7. Shuvalov V. P. *Prijom signalov s ocenкой ih kachestva* [Reception of signals with the estimation of their quality]. Moscow: Telecommunications, 1979. 240 p.
8. Fink L. M. *Teorija peredachi diskretnyh soobshhenij* [Theory of passing of discrete messages]. Moscow: SU radio, 1970. 727 p.
9. *Statisticheskaja teorija svjazi i ejo prakticheskie primenenija* [Statistical communication theory and its practical applications]. / B. R. Levin. Moscow: Telecommunications, 1979. 288 p.
10. Varakin L. E. *Sistemy svjazi s shumopodobnymi signalami* [Telecommunication systems with noisesimilar signals]. Moscow: Radio and telecommunications, 1985. 384 p.

References (transliterated)

1. Vishnevsky V. M., Lyahov A. I., Portnoy S. L., Shahnovich I. V. *Shirokopolosnye besprovodnye seti peredachi informacii* [Off-wire broadband of information transfer]. Moscow: Technosfera, 2005. 592 p.

Поступила (received) 04.06.2018

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Брезгунов Олександр Володимирович (Брезгунов Александр Владимирович, Brezgunov Olexandr Vladimirovych) – кандидат технічних наук, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», старший викладач кафедри радіоелектроніки; e-mail: brezgunovu@gmail.com

Брезгунов Сергій Олександрович (Брезгунов Сергей Александрович, Brezgunov Sergey Olexandrovych) – спеціаліст, м. Київ, ПП, інженер; e-mail: bigsun0407@gmail.com

УДК 621.391

А.В. БРЕЗГУНОВ, С.А. БРЕЗГУНОВ**ПРИЁМ РАДИОСИГНАЛОВ С ФАЗОВОЙ КОМПЕНСАЦИЕЙ ПОМЕХ**

Рассмотрена идея компенсации помех типа белый шум и помех от радиостанций, сигналы которых близки по спектру с принимаемыми сигналами. Это достигается за счёт приёма сигнала по двум каналам. Сначала сигналы попадают на широкополосные полосовые фильтры с одинаковыми параметрами. На выходах этих фильтров белый шум мало изменяет свою первоначальную форму и представляет собой последовательность суммы двухполюсных импульсов формы близкой к треугольной. В первом канале осуществляется режекция части спектра, занятой принимаемым сигналом. В результате этого, энергия шума в этом канале немного уменьшается, но форма импульсов шума и их временное положение мало отличается от импульсов белого шума второго канала. Затем сигналы с выходов двух каналов проходят через полосовые фильтры с одинаковыми параметрами и с полосой пропускания, равной полосе частот принимаемого сигнала. Затем инвертированный сигнал поступает на сумматор с первого канала и со второго канала без инверсии. Так как эти сигналы отличаются в основном только наличием принимаемого сигнала в сигнале второго канала, то на выходе сумматора присутствует принимаемый сигнал, а шум и помехи от радиостанций с близким частотным спектром в значительной степени компенсированы.

Ключевые слова: сигнал, шум, режекция спектра, инвертирование амплитуд, полосовой фильтр.

О.В. БРЕЗГУНОВ, С.О. БРЕЗГУНОВ**ПРИЙОМ РАДИОСИГНАЛІВ З ФАЗОВОЮ КОМПЕНСАЦІЮ ЗАВАД**

Розглянуто ідея компенсації завад типу білий шум і завад від радіостанцій, сигнали яких близькі по спектру з сигналами, що приймаються. Це досягається за рахунок прийому сигналу по двох каналах. Спочатку сигнали потрапляють на широкосмугові смугові фільтри з однаковими параметрами. На виходах цих фільтрів білий шум мало змінює свою первинну форму і є послідовністю суми двохполюсних імпульсів форми близької до трикутної. У першому каналі здійснюється режекція частини спектру, зайнятої сигналом, що приймається. В результаті цього, енергія шуму в цьому каналі трохи зменшується, але форма імпульсів шуму і їх тимчасове положення мало відрізняється від імпульсів білого шуму другого каналу. Потім інвертований сигнал поступає на суматор з першого каналу і з другого каналу без інверсії. Оскільки ці сигнали відрізняються в основному тільки наявністю сигналу, що приймається, в сигналі другого каналу, то на виході суматора є присутнім сигнал, що приймається, а шуми і перешкоди від радіостанцій з близьким частотним спектром в значно мірі компенсовані.

Ключові слова: сигнал, шум, режекція спектру, інвертування амплітуд, смуговий фільтр.

O.V. BREZGUNOV, S.O. BREZGUNOV**RECEIVING OF THE RADIO SIGNALS WITH PHASE COMPENSATION OF HINDRANCES**

The idea of indemnification of hindrances of type is considered white noise and hindrances from the wireless stations the signals of that are near on a spectrum with the accepted signals. It is arrived at due to the reception of signal on two channels. First signals get on broadband band filters with identical parameters. On the exits of these filters white noise small changes the primary form and is a sequence of sum of twoarctic impulses of form near to three-cornered. Nulling of part of spectrum, busy at the accepted signal, comes in the first channel true. As a result of it, energy of noise a bit diminishes in this channel, but the form of impulses of noise and their temporal position small differ from the impulses of white noise of the second channel. Then signals from the exits of two channels pass through band filters with identical parameters and with the stripe of key-in, to the equal stripe of frequencies of the accepted signal. The then inverted signal acts on a summator from the first channel and from the second channel without an inversion. Because these signals differ mainly only by the presence of the accepted signal in the signal of the second channel, then on the exit of summator the accepted signal is present, and noises and hindrances from the wireless stations with a near frequency spectrum in degrees are compensated considerably.

Keywords: signal, noise, spectrum nulling, inverting of amplitudes, band filter.

Введение. Повышение энергетической эффективности радиотехнических систем является одной из самых актуальных задач систем связи, навигации и радиолокации [1–10]. Переданный сигнал $S(t)$ может изменить свои параметры из-за внешней модуляции, например, из-за эффекта Доплера или многолучевого распространения. О сигнале после внешней модуляции $S'(t)$ может быть известен лишь интервал частот $\Delta\omega$ изменения его центральной частоты ω' и ориентировочно занимаемая им полоса частот $\Delta\omega$. Для восстановления сигнала $S'(t)$ в условиях, когда мощность P_S принятого сигнала $S'(t)$ мала по сравнению с мощностью принятой помехи P_N , необходимо добиться увеличения соотношения P_S/P_N . Компенсация помех типа белый шум, может быть достигнута за счёт приёма сигнала по двум каналам с широкополосными полосовыми фильтрами с одинаковыми параметрами. Можно осуществить режекцию в первом канале части его спектра, занятой

принимаемым сигналом $S'_1(t)$, и сложить сигналы $S'_1(t)$ и $S'_2(t)$ с выходов двух каналов с полосовыми фильтрами, имеющими одинаковые параметры и полосы пропускания $\Delta\omega$, равные полосе частот принимаемого сигнала, после инверсии сигнала $S'_1(t)$. Тогда, в результате сложения получим принимаемый сигнал $S'_2(t)$, и разность мало отличающихся шумов. Таким образом, можно значительно скомпенсировать воздействие помех и увеличить соотношение P_S/P_N .

Цель статьи – рассмотреть идею фазовой компенсации помех типа белый шум, путём сложения выходных сигналов канала с инвертированными помехами и режекцией спектра, принятого сигнала и канала без инверсии помех и режекции спектра принятого сигнала.

© А.В. Брезгунов, С.А. Брезгунов, 2018

Основная часть. Пусть в линию связи с флюктуационным гауссовым шумом, на несущей частоте ω с начальной фазой φ_0 и амплитудой $A(t)$ в полосе частот Π передаётся узкополосный сигнал $S(t)=A(t) \cdot \text{Cos}(\omega t + \varphi_0)$ длительностью t_1

$$S(t) = A \cdot \text{Cos}(\omega t + \varphi_0). \quad (1)$$

Схема приёма содержит два канала с широкополосными полосовыми фильтрами на входе, имеющие одинаковые параметры. Первый канал имеет режектор части спектра, занятой принимаемым сигналом. Каждый канал кроме этого содержит полосовые фильтры с одинаковыми параметрами и с полосой пропускания, равной полосе частот принимаемого сигнала. В первый канал включен инвертор. Выходы каналов подключены к сумматору, выход которого является выходом схемы фазовой компенсации помех.

После внешней модуляции на входы широкополосных полосовых фильтров с одинаковыми параметрами первого и второго канала поступают сигналы $S'(t)$ с полосой частот $\Delta\omega_s$ и длительностью t_2

$$S'(t) = A'(t) \cdot \text{Cos}(\omega' t + \varphi'_0). \quad (2)$$

С учётом воздействия белого шума $n(t)$ получаем в каналах приёма сигналы

$$S^*(t) = A'(t) \cdot \text{Cos}(\omega' t + \varphi'_0) + n(t). \quad (3)$$

Белый шум $n(t)$ представляет собой последовательность суммы двухполярных импульсов формы близкой к треугольной [4, 6]. После широкополосной частотной фильтрации в тракте приёма фильтрами с полосой пропускания $\Delta\omega_{\text{шф}}$ ($\Delta\omega_{\text{шф}} \gg \Delta\omega_s$) получим флюктуационный гауссов шум $n'(t)$ с мощностью $P_{N'}$, имеющий спектральную плотность мощности близкую к равномерной (рис. 1) [4, 6]. Форма шума $n'(t)$ – последовательность суммы двухполярных импульсов формы близкой к треугольной, несколько отличающейся от $n(t)$.

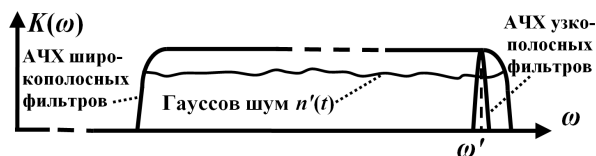


Рис. 1. Амплитудно-частотные характеристики широкополосного частотного полосового фильтра и узкополосного частотного полосового фильтра, спектральная плотность флюктуационного гауссова шума

На выходе широкополосных фильтров, для простоты записи полагая, что амплитуда $A'(t)$ не изменится, получим сигналы

$$S^{**}(t) = S'(t) + n'(t) = A'(t) \cdot \text{Cos}(\omega' t + \varphi'_0) + n'(t). \quad (4)$$

Тогда, после режекции спектра, принятого сигнала в первом канале на его выходе останется

$$S_1^{**}(t) = n_1'(t), \quad (5)$$

где $n_1'(t)$ – это модифицированная помеха $n'(t)$ с мощностью $P_{1N'}$ несколько меньшей мощности второго канала $P_{2N'} = P_{N'}$ на величину $\Delta P_{N'} \ll P_{1N'}$.

Полагаем, что форма импульсов помех в двух каналах после режекции небольшой части их спектра и их взаимное временное положение изменится незначительно. Режекция части спектра принятого сигнала широко используется при обработке широкополосных шумоподобных сигналов, что приводит к уменьшению их мощности, но в значительно большей степени уменьшает мощность сосредоточенных по спектру помех [1].

На выходе второго канала сигнал $S^{**}(t)$ останется без изменений

$$S_2^{**}(t) = S'(t) + n'(t) = S^{**}(t). \quad (6)$$

Затем сигналы $S_1^{**}(t)$ и $S_2^{**}(t)$ проходят через узкополосные полосовые фильтры (колебательные контура) с одинаковыми параметрами и с полосой пропускания $\sim \Delta\omega_s$, равной полосе частот принятого сигнала (рис. 1) и получим сигналы $S_1^{***}(t)$ и $S_2^{***}(t)$ соответственно.

Известно, что резонансная частота контура ω определяет отклик контура на воздействие флюктуационного гауссового шума – суммы помеховых импульсов различной длительности, амплитуды и формы, т.е. форму и среднее значение частоты ω помехи $n(t)$ после частотной фильтрации [4, 6]. Поэтому, после узкополосной частотной фильтрации помехи $n_1'(t)$ и $n_2'(t)$, в каналах получаем флюктуационный гауссов шум $n_{01}'(t)$ и $n_{02}'(t)$ с центральной частотой ω' . Фаза шумов изменяется во времени $\varphi_1(t)$ и $\varphi_2(t)$ в пределах полосы частот $\sim \Delta\omega_s$, пропускаемых контурами, относительно ω' и шумы имеют амплитуды $B_1(t)$ и $B_2(t)$ и начальные фазы φ_{10n} и φ_{20n} [4]:

$$n_{01}'(t) = B_1(t) \cdot \text{Cos}[(\omega' t + \varphi_1(t))], \quad (7)$$

$$n_{02}'(t) = B_2(t) \cdot \text{Cos}[(\omega' t + \varphi_2(t))]. \quad (8)$$

После сложения инвертированного сигнала $S_1^{***}(t) = n_1'(t)$ и неинвертированного сигнала $S_2^{***}(t) = S'(t) + n_2'(t)$ получим:

$$S^{**}(t) = A'(t) \cdot \text{Cos}(\omega' t + \varphi'_0) - n_{01}'(t) + n_{02}'(t). \quad (9)$$

Из выражений (7), (8) и (9) видно, что при $B_1(t) \approx B_2(t)$ и $\varphi_1(t) \approx \varphi_2(t)$ получаем $S^{**}(t) \approx S'(t)$, то есть величина помехи $n(t)_\Sigma$, полученной после сложения инвертированного сигнала $S_1^{***}(t)$ и неинвертированного сигнала $S_2^{***}(t)$ стремится к нулю ($n(t)_\Sigma \rightarrow 0$).

Если узкополосный полосовой фильтр находится в верхней части амплитудно-частотной

характеристики широкополосного фильтра (рис. 1), то из-за ограничения полосы импульсов шума $n'(t)$ по частоте сверху после режекции их спектра передние фронты у импульсов шума $n_1'(t)$ станут более пологими, чем у импульсов шума $n_2'(t)$ [6]. Разность фаз $\Delta\varphi_1(t)$ помех $n_1'(t)$ и $n_2'(t)$ будет несколько отличаться от нуля (рис. 2):

$$\Delta\varphi_1(t) = \varphi_1(t) - \varphi_2(t) \neq 0.$$

Тогда $n(t)_{\Sigma 1} \neq 0$ и $B_1(t) < B_2(t)$ (рис. 2).

Даже если $\Delta\varphi_1(t)$ будет приближаться к $\pm 45^\circ$, то амплитуда шума $n(t)_{\Sigma 1}$ будет всё равно меньше амплитуды помехи, то есть амплитуда $n_1'(t)$ уменьшится в $\sim 1,3$ раза, а мощность $n_1'(t)$ уменьшится в $\sim 1,7$ раза.

При осуществлении других вариантов режекции спектра принятого сигнала в других частях полосы пропускания широкополосного фильтра, разность фаз помех $n_1'(t)$ и $n_2'(t)$ будет отличаться от $\Delta\varphi_1(t)$ после их сложения и результаты также будут отличаться от $n(t)_{\Sigma 1}$. Получим для варианта 2 – $\Delta\varphi_2(t)$ и $n(t)_{\Sigma 2}$, для варианта 3 – $\Delta\varphi_3(t)$ и $n(t)_{\Sigma 3}$.

При небольших отличиях форм и фаз помех $n_1'(t)$ и $n_2'(t)$, произойдёт значительная взаимная их компенсация. Можно осуществлять измерения средних значений амплитуд после фильтрации, например, с использованием амплитудных детекторов огибающей за короткие интервалы времени. Если при вычитании из смеси $S_2''^{**}(t) = S'(t) + n_2'(t)$ помехи $n_1'(t)$ (амплитуда сигнала больше амплитуды помехи) результат изменится на значение близкое к значению амплитуды помехи $n_1'(t)$, то помехи $n_1'(t)$ и $n_2'(t)$ имеют сдвиг фаз допустимого значения $\Delta\varphi_{\text{доп}}$ и $n(t)_{\Sigma} \leq \varepsilon$ (ε – допустимая погрешность компенсации помех). Те участки, где $n(t)_{\Sigma} > \varepsilon$ можно исключить из дальнейшей обработки (учтя в конечном результате) или возможно применить подстройку $\Delta\varphi$ с помощью, например, варикапа включённого в узкополосный контур одного из каналов.

Также, можно реализовать перестраиваемые фазосдвигающие цепочки (с варикапами), включённые после узкополосных полосовых фильтров изменяющие сдвиг фаз $\Delta\varphi$ до тех пор, пока не получим результат вычитания близкий к значению амплитуды помехи $n_1'(t)$.

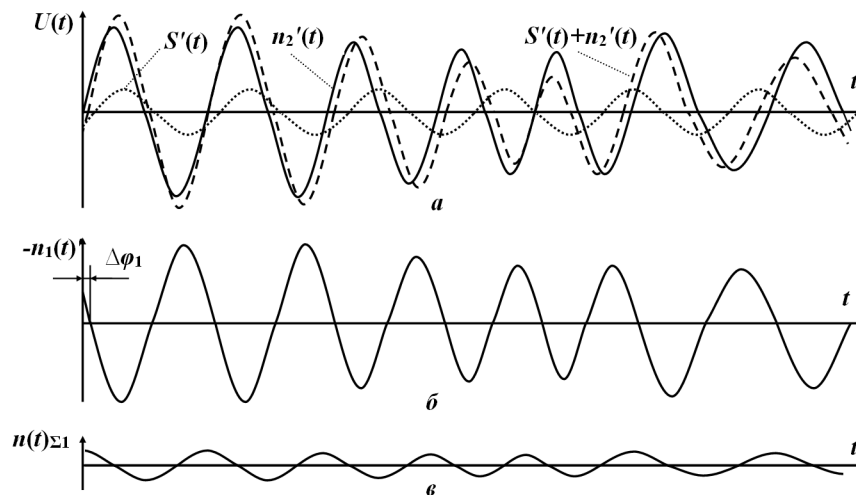


Рис. 2. Временное изменение сигналов и помех: *a* – принятый сигнал $S'(t)$, помеха $n_2'(t)$, сумма принятого сигнала $S'(t)$ и помехи $n_2'(t)$; *б* – инвертированная помеха $n_1'(t)$, отстающая по фазе на $\Delta\varphi_1(t)$ от помехи $n_2'(t)$; *в* – результат сложения помех $n_2'(t)$ и $-n_1'(t)$

Если амплитуда сигнала меньше амплитуды помехи, то необходимо учесть, что если отличие фаз помех $n_1'(t)$ и $n_2'(t)$ и сигнала $S'(t)$ меньше 180° , то сложение $S'(t)$ и $n'(t)$ приводит к увеличению значения амплитуды смеси $S'(t) + n'(t)$ (рис. 2, *a*). Если отличие этих фаз меньше 180° , то эта амплитуда уменьшается. В этом случае результат вычитания из амплитуды смеси $S'(t) + n_2'(t)$ амплитуды помехи $n_1'(t)$ при значении амплитуды сигнала меньшей значения амплитуды помехи, получится отрицательное значение. В этом случае необходимо предусмотреть формирование управляющего напряжения для реактивного элемента (варикапа) по значению модуля (без учета знака) этого результата вычитания. Например, результат вычитания можно возвести в

квадрат с помощью квадратора (перемножителя). Система автоподстройки фаз помех двух каналов может быть реализована различными способами, в том числе и с использованием микроконтроллеров. Однако при использовании микроконтроллеров, верхнее значение частот обрабатываемых сигналов $S'(t)$ ограничено их быстродействием. В настоящее время оно составляет величину около 100 мГц.

Для дальнейшей «очистки» сигнала от помех можно использовать то, что в зависимости от положения спектра принимаемого сигнала в полосе широкополосного фильтра, фазы модифицированных помех будут разными. То есть, если организовать, например, три схемы обработки, описанные выше, то не скомпенсированные помехи в них будут мало

коррелированными. Реализовав метод когерентного накопления [6], можно увеличить соотношение P_S/P_N ещё до трёх раз. Этот метод может использоваться и без системы автоподстройки фаз помех двух каналов. С увеличением числа схемы обработки для реализации метода когерентного накопления эффективность метода будет падать из-за возрастания корреляции между помехами.

Рассмотренный подход может позволить также и компенсацию помех от радиостанций, сигналы которых близки по спектру с принимаемыми сигналами, так как сигналы этих радиостанций при сложении после инверсии в одном из каналов взаимно компенсируются.

Выводы. 1. Первоначальные оценки рассмотренного подхода показывают, что в настоящее время он может быть реализован. Несомненно, возможно обеспечение повышения соотношения P_S/P_N за счёт вычитания из принятой смеси сигнала и шума во втором канале модифицированного шума первого канала. Значение мощности шума после компенсации помех может быть очень мало (стремиться к нулю) и определяется многими факторами, такими как полоса частот принимаемого сигнала, полоса частот широкополосных фильтров и др. Требуются дальнейшие исследования по оценке эффективности и реализации предложенного метода компенсации помех.

2. Предложенный метод компенсации помех предназначен для «первичной очистки» от шума, когда о принимаемом сигнале может быть неизвестно ничего, кроме ориентировочного значения, занимаемых им частот.

3. Степень компенсации помех во многом определяется качеством автоподстройки фаз помех двух каналов. Разработка этой системы так же требует дополнительных исследований.

4. Соотношение P_S/P_N , даже без системы автоподстройки фаз помех двух каналов, возрастёт как минимум, в несколько раз. Даже если разность фаз помех $n_1(t)$ и $n_2(t)$ будет приближаться к $\Delta\varphi_1(t) = \pm 45^\circ$, то соотношение P_S/P_N увеличится в $\sim 1,7$ раза. Увеличив число описанных схем обработки с одной до трёх и реализовав метод когерентного накопления, можно увеличить соотношение P_S/P_N ещё до трёх раз, то есть P_S/P_N будет увеличено примерно в 5 раз.

Список литературы

1. Варакин Л. Е. *Системы связи с шумоподобными сигналами*. М.: Радио и связь, 1985. 384 с.
2. Григорьев В. А., Лагутенко О. И., Распаев Ю. А. *Сети и системы радиодоступа*. М.: Эко-Трендз, 2005. 384 с.
3. *Защищённые радиосистемы цифровой передачи информации* / П. Н. Сердюков, А. В. Бельчиков, А. Е. Дронов и др. М.: АСТ, 2006. 403 с.
4. *Радиотехнические цепи и сигналы: Учеб. для вузов по спец. «Радиотехника»* / С. И. Баскаков. 5-е изд. М.: Высш. шк., 2005. 462 с.
5. Тихонов В. И. *Статистическая радиотехника*. М.: Радио и связь, 1982. 624 с.
6. *Основы теории информации и кодирования* / И. В. Кузьмин, В. А. Кедрус. 2-е изд. К.: Вища шк. Головное изд-во, 1986. 238 с.
7. Шувалов В. П. *Приём сигналов с оценкой их качества*. М.: Связь, 1979. 240 с.
8. Финк Л. М. *Теория передачи дискретных сообщений*. М.: Сов. радио, 1970. 727 с.
9. *Статистическая теория связи и её практические применения* / Под ред. Б. Р. Левина. М.: Связь, 1979. 288 с.
10. Вишневецкий В. М., Ляхов А. И., Портной С. Л., Шахнович И. В. *Широкополосные беспроводные сети передачи информации*. М.: Техносфера, 2005. 592 с.

References (transliterated)

1. Varakin L. E. *Sistemy svyazi s shumopodobnymi signalami* [Telecommunication systems with noisesimilar signals]. Moscow: Radio and telecommunications, 1985. 384 p.
2. Grigoriev V. A., Lagutenko O. I., Raspaev U. A. *Seti i sistemy radiodostupa* [Networks and systems of radioaccess]. Moscow: Eko-Trends, 2005. 384 p.
3. *Zashhishhjonnye radiosistemy cifrovoj peredachi informacii* [Protected radiosistemy of digital information transfer] / P. N. Serdukov, A. V. Belchikov, A. E. Dronov and other. Moscow: AST, 2006. 403 p.
4. *Radiotekhnicheskie cepi i signaly: Ucheb. dlja vuzov po spec. «Radiotekhnika»* [Radio Circuits and Signals: Proc. for by special institutions. "Radio engineering"] / S. I. Baskakov. Fifth edition. Moscow: High school, 2005. 462 p.
5. Tihonov V. I. *Statisticheskaja radiotekhnika* [Statistical radio engineering]. Moscow: Radio and telecommunications, 1982. 624 p.
6. *Osnovy teorii informacii i kodirovanija* [Fundamentals of information theory and coding] / I. V. Kuzmin, V. A. Kedrus. Second edition. Kiev, High school, 1986. 238 p.
7. Shuvalov V. P. *Prijom signalov s ocenкой ih kachestva* [Reception of signals with the estimation of their quality]. Moscow: Telecommunications, 1979. 240 p.
8. Fink L. M. *Teorija peredachi diskretnyh soobshhenij* [Theory of passing of discrete messages]. Moscow: SU radio, 1970. 727 p.
9. *Statisticheskaja teorija svyazi i ejo prakticheskie primenenija* [Statistical communication theory and its practical applications]. / B. R. Levin. Moscow: Telecommunications, 1979. 288 p.
10. Vishnevsky V. M., Lyahov A. I., Portnoy S. L., Shahnovich I. V. *Shirokopolosnye besprovodnye seti peredachi informacii* [Off-wire broadband of information transfer]. Moscow: Texnosfera, 2005. 592 p.

Поступила (received) 04.06.2018

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Брезгунов Олександр Володимирович (Брезгунов Александр Владимирович, Brezgunov Oleksandr Vladimirovych) – кандидат технічних наук, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», старший викладач кафедри радіоелектроніки; e-mail: brezgunovu@gmail.com.

Брезгунов Сергій Олександрович (Брезгунов Сергей Александрович, Brezgunov Sergey Oleksandrovych) – спеціаліст, м. Київ, ПП, інженер; e-mail: bigsun0407@gmail.com.

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 радара. 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 радара. 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 тракті 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.

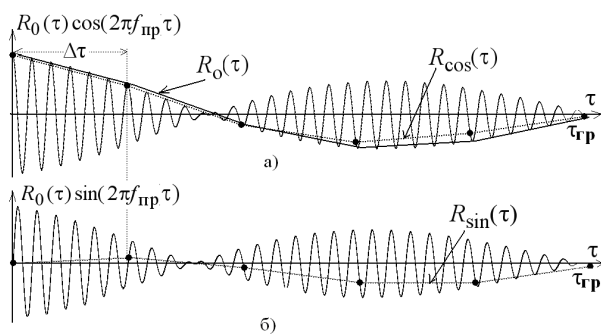


Рис. 1. Ортогональні складові АКФ сигналу розсіяння та їх цифрові значення на виході корелятора (точки)

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.

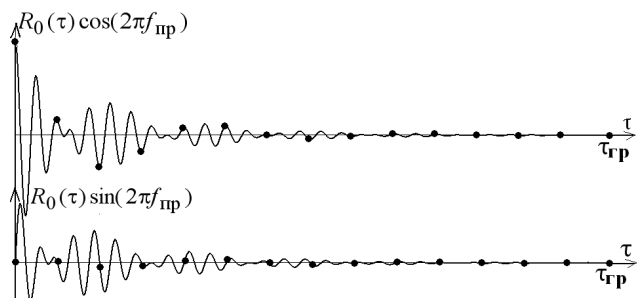


Рис. 2. Звуження форми АКФ сигналу розсіяння для випадку досліджень верхньої іоносфери

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.

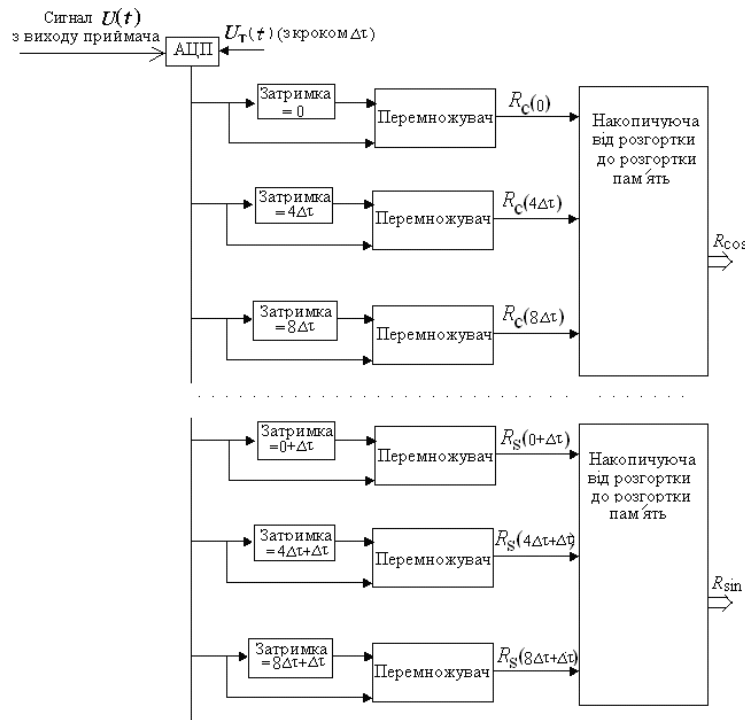


Рис. 3. Схема корелятора для одночасного отримання синусних та косинусних значень ординат АКФ

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.

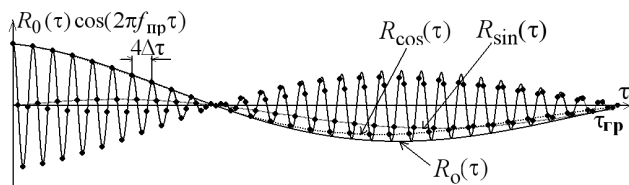


Рис. 4. Розрахунок ординат АКФ для випадку отримання на періоді сигналу проміжної частоти 4 його відліків (точки)

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.

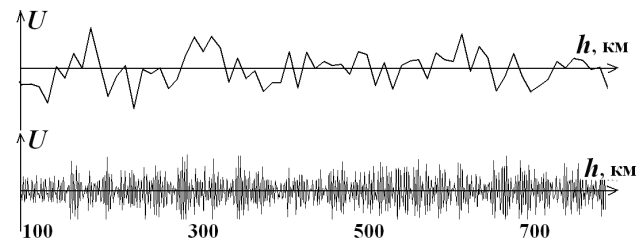


Рис. 5. Отриманий результат цифрового перетворення сигналу при періоді тактування АЦП 30 мкс (верх) та 0,25 мкс (низ)

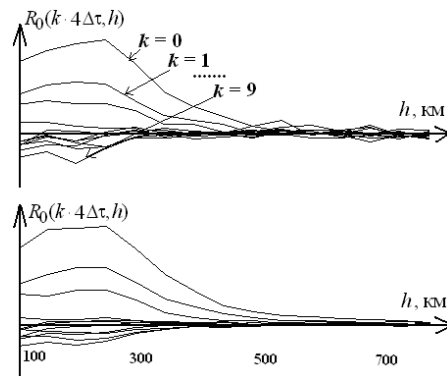


Рис. 6. Результат розрахунку ординат АКФ для двох масивів з рис. 5

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. Ємельянов, 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. Ємельянов, 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 nekoherentnogo 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 nekoherentnogo rasseyaniya radyovoln: monografyya [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.

Ємельянов 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.

М. А. ШУЛЬГА, Д. В. КОТОВ, А. В. БОГОМАЗ

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕАКЦИИ КОНЦЕНТРАЦИИ ЭЛЕКТРОНОВ В МАКСИМУМЕ СЛОЯ F2 ИОНОСФЕРЫ НА СЛАБУЮ ГЕОМАГНИТНУЮ БУРЮ 24 ДЕКАБРЯ 2017 Г. В РАЗНЫХ ШИРОТАХ ЕВРОПЕЙСКОГО РЕГИОНА

Представлены результаты исследования вариаций концентрации электронов в максимуме слоя F2 по данным ионозондов, расположенных в разных геомагнитных широтах Европейского региона. Проведён анализ влияния слабой геомагнитной бури 24 декабря 2017 г. на вариации концентрации электронов $NmF2$. Показано, что для внешних магнитных силовых трубок в магнитоспокойный период (22 – 24 декабря 2017 г.) значения концентрации электронов $NmF2$ увеличивались в ночные часы в 1.5 раза. В результате слабой геомагнитной бури (минимальное значение $Dst \approx -22$ нТ, максимальное значение $K_p=3+$) 24 декабря 2017 г. наблюдалось уменьшение значений $NmF2$ в 1.5 – 2 раза в ночные часы 25 – 26 декабря 2017 г. Выявлено, что внутренние области магнитосферы ($L \approx 1.56, 1.456$) не сильно подвержены влиянию слабых геомагнитных бурь. Рассмотрены физические механизмы, влияющие на увеличение (нисходящий поток ионов H^+ из плазмосферы в ионосферу) и уменьшение значений $NmF2$ (частичное опустошение магнитной силовой трубки в утренние часы 25 декабря 2017 г. и ослабленный нисходящий поток ионов H^+ в ночные часы 25 – 26 декабря 2017 г.).

Ключевые слова: геомагнитная буря, ионосфера, критическая частота, концентрация электронов, ионозонд, магнитная силовая трубка.

М. О. ШУЛЬГА, Д. В. КОТОВ, О. В. БОГОМАЗ

ДОСЛІДЖЕННЯ РЕАКЦІЇ КОНЦЕНТРАЦІЇ ЕЛЕКТРОНІВ В МАКСИМУМІ ШАРУ F2 ІОНОСФЕРИ НА СЛАБКУ ГЕОМАГНІТНУ БУРЮ 24 ГРУДНЯ 2017 Р. В РІЗНИХ ШИРОТАХ ЄВРОПЕЙСЬКОГО РЕГІОНУ

Представлені результати дослідження варіацій концентрації електронів в максимумі шару F2 за даними іонозондів розташованих у різних геомагнітних широтах Європейського регіону. Проведено аналіз впливу слабкої геомагнітної бури 24 грудня 2017 р. на варіації концентрації електронів $NmF2$. Показано, що для зовнішніх магнітних силових трубок в магнітоспокійний період (22 – 24 грудня 2017 р.) значення концентрації електронів $NmF2$ збільшувались у нічні години в 1.5 рази. В результаті слабкої геомагнітної бури (мінімальні значення $Dst \approx -22$ нТ, максимальні значення $K_p=3+$) 24 грудня 2017 р. спостерігалось зменшення значень $NmF2$ в 1.5 – 2 рази в нічні години 25 – 26 грудня 2017 р. Виявлено, що внутрішні області магнітосфери ($L \approx 1.56, 1.456$) не сильно піддаються впливу слабких геомагнітних бурь. Розглянуто фізичні механізми що впливають на збільшення (низхідний потік іонів H^+ із плазмосфери в іоносферу в нічні години) та зменшення значень $NmF2$ (часткове спустошення магнітної силової трубки в ранкові години 25 грудня 2017 р. та ослаблений низхідний потік іонів H^+ у нічні години 25 – 26 грудня 2017 р.).

Ключові слова: геомагнітна буря, іоносфера, критична частота, концентрація електронів, іонозонд, магнітна силова трубка.

М. О. SHULHA, D. V. KOTOV, O. V. BOGOMAZ

INVESTIGATION OF THE IONOSPHERIC F2-LAYER ELECTRON DENSITY PEAK REACTION TO WEAK GEOMAGNETIC STORM OF DECEMBER 24, 2017 FOR DIFFERENT LATITUDES OF THE EUROPEAN REGION

The results of investigation of variations of the ionospheric F2-layer electron density peak according to ionosonde data located in different geomagnetic latitudes of the European region are presented. The analysis of the effect of weak geomagnetic storm on December 24, 2017 on the electron density variations $NmF2$ was carried out. It is shown that for external magnetic flux tubes during magnetically quiet period (December 22 – 24, 2017) the nighttime values of electron density $NmF2$ were increased by a factor of 1.5. As a result of a weak geomagnetic disturbance (minimum of $Dst \approx -22$ nT, maximum of $K_p=3+$) of December 24, 2017 a factor of 1.5 – 2 decrease in $NmF2$ values during nighttime of December 25 – 26, 2017 was observed. It was revealed that the deeper magnetosphere ($L \approx 1.56, 1.456$) is not strongly exposed by the weak geomagnetic storms. The physical mechanisms influencing the increase (downward plasmaspheric H^+ flux during nighttime) and decrease in $NmF2$ values (partial depletion of magnetic flux tube in the morning hours of December 25, 2017 and weaker downward H^+ flux during the night of December 25 – 26, 2017) are considered.

Keywords: geomagnetic storm, ionosphere, critical frequency, electron density, ionosonde, magnetic flux tube.

Введение. Электронная концентрация является основным параметром ионосферы. В частности, информация об электронной концентрации в максимуме слоя F2 ($NmF2$) важна для бесперебойной работы высокочастотной радиосвязи, функционирования радиолокационных систем, спутниковой навигации, моделирования ионосферы, а также для описания поведения ионосферы при различных условиях космической погоды.

В настоящее время исследованиям и анализу вариаций $NmF2$ посвящено много работ [см., например, 1 – 5], которые описывают долготные,

сезонные, годовые, суточные зависимости $NmF2$ от уровня солнечной и геомагнитной активности для разных регионов земного шара. Стоит отметить, что особое внимание уделяется исследованию влияния сильных геомагнитных бурь на ионосферу. Однако, изучение и анализ поведения параметров ионосферной плазмы при слабых геомагнитных возмущениях не менее актуально, поскольку существенные изменения ионосферы происходят даже при очень слабом росте геомагнитной активности.

В наших предыдущих исследованиях в спокойных условиях были выявлены эффекты

Таблица 1. Список ионозондов, используемых в данном исследовании

Название станции	Географические координаты	Геомагнитная широта	Параметр Мак-Иллвейна (на высоте 300 км)
Moscow	55.47°N, 37.3°E	51.08°N	2.722
Juliusruh	54.6°N, 13.4°E	53.93°N	2.671
Chilton	51.5°N, 359.4°E	53.27°N	2.376
Dourbes	50.1°N, 4.6°E	51.05°N	2.211
Pruhonice	50°N, 14.6°E	49.29°N	2.178
Kharkiv	49.6°N, 36.3°E	45.51°N	2.129
San Vito	40.6°N, 17.8°E	39.63°N	1.56
Athens	38°N, 23.5°E	36.16°N	1.456

увеличения $NmF2$ в период зимних ночей за счёт сильного нисходящего потока ионов H^+ из плазмосферы в ионосферу и уменьшения $NmF2$ за счёт опустошения магнитной силовой трубки над г. Харьковом слабыми магнитными бурями (при этом нисходящий ночной поток уменьшается) [6]. Такой эффект, например, был зарегистрирован над нами для периода близкого к зимнему солнцестоянию 22 – 26 декабря 2017 г. [7].

Целью данной работы является исследование и анализ временных вариаций $NmF2$ для этого периода и выявление эффекта слабой геомагнитной бури 24 декабря 2017 г. ($K_p=3+$, минимальное значение $Dst \approx -22$ нТ) в разных широтах Европейского региона.

Средства и методы. В настоящей работе использованы данные о критической частоте слоя F2 ионосферы $foF2$, полученные с помощью ионозонда расположенного в обсерватории Института ионосферы и базы цифровых ионограмм Digital Ionogram Database для 7 станций вертикального зондирования ионосферы расположенных в разных геомагнитных широтах Европейского региона [8].

Расположение этих станций представлено на рис. 1. Более подробные сведения о них приведены в табл. 1.

Для расчёта значений концентрации электронов в максимуме слоя F2 ионосферы использовано следующее соотношение [4, 5]:

$$NmF2 = foF2^2 \cdot 1.24 \cdot 10^{10} \quad (1)$$

где $NmF2$ – электронная концентрация в максимуме слоя F2 (m^{-3});

$foF2$ – критическая частота слоя F2 ионосферы (MHz).

Результаты наблюдений и обсуждение. На рис. 2 и 3 представлены суточные и широтные вариации концентрации электронов в максимуме слоя F2 ионосферы для периода, близкого к зимнему солнцестоянию 22 – 26 декабря 2017 г. С полуночи 22 декабря 2017 г. до полудня 24 декабря 2017 г. была спокойная геомагнитная обстановка. Значения планетарного индекса K_p варьировались от 0 до 1+. При этом, по-видимому, происходило увеличение концентрации нейтрального водорода, и, как результат, усиливался поток ионов водорода H^+ из ионосферы в плазмосферу в течение дневных часов. Это в свою очередь привело к сильному нисходящему потоку ионов H^+ из магнитной силовой трубки в ночные часы. Эти ионы H^+ , передавая свой заряд нейтральным атомам кислорода O, тем самым увеличивают концентрацию атомарного кислорода O^+ . В свою очередь ионы кислорода O^+ на высотах слоя F2 и выше являются доминирующей составляющей и $N_e \approx N(O^+)$ [9]. Отсюда рост концентрации ионов O^+ приводит к увеличению концентрации электронов в области максимума слоя F2. Вероятнее всего, именно поэтому мы видим увеличение $NmF2$ от ночи к ночи в магнитоспокойный период. Как видно из рис. 2 и 3 для станций Juliusruh, Chilton, Dourbes и Prochoise (L-оболочки 2.671, 2.376, 2.311 и 2,138 соответственно) в ночные часы 22 – 23 и 23 – 24 декабря $NmF2 \approx 1.4 \cdot 10^{11} m^{-3}$, тогда как в период 24 – 25 декабря ночные значения $NmF2$ составляли уже порядка $2.1 \cdot 10^{11} m^{-3}$. Таким образом, $NmF2$ увеличилась почти в 1.5 раза.

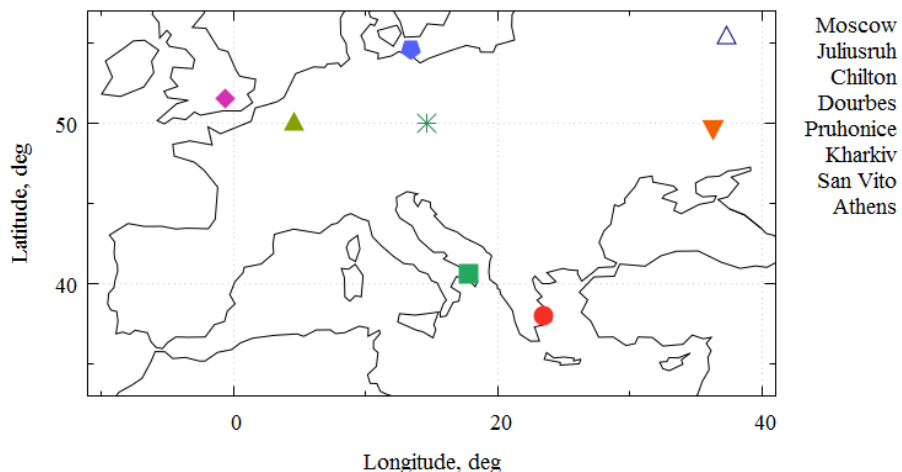


Рис. 1. Расположение станций вертикального зондирования в Европейском регионе

Для более низкоширотных станций San Vito и Athens с L-оболочками 1.56 и 1.456 соответственно, такой эффект увеличения электронной концентрации в ночные часы был выражен слабее (см. рис. 3). $NmF2$ была порядка $0.8 \cdot 10^{11} \text{ м}^{-3}$ для 22 – 23 декабря и незначительно выросла 23 – 24 декабря и 24 – 25 декабря до $1.3 \cdot 10^{11} \text{ м}^{-3}$ (увеличение $NmF2$ примерно в 1.5 раза).

После полудня 24 декабря 2017 г. наблюдался небольшой рост Кр до значения 3+. Из вариаций концентрации электронов видно, что даже этого небольшого роста оказалось достаточно для изменения поведения $NmF2$ в ночное время суток 25 – 26 декабря 2017 г.

На рис. 3, б видно, что $NmF2$, полученная для Харькова, уменьшилась в 2 раза по сравнению со значениями концентрации для предыдущей ночи. Подобное поведение электронной концентрации в этот период прослеживается и на станциях в Pruhonice, Juliusruh. Для Moscow, Chilton и Dourbes $NmF2$ уменьшилась почти в 1.5 раза.

В более низкоширотных областях по данным станций, расположенных в San Vito и Athens, подобного эффекта уменьшения электронной концентрации не наблюдалось. Как в ночь 24 – 25 декабря, так и в ночь 25 – 26 декабря $NmF2$ была практически неизменна и составляла порядка $1.3 \cdot 10^{11} \text{ м}^{-3}$.

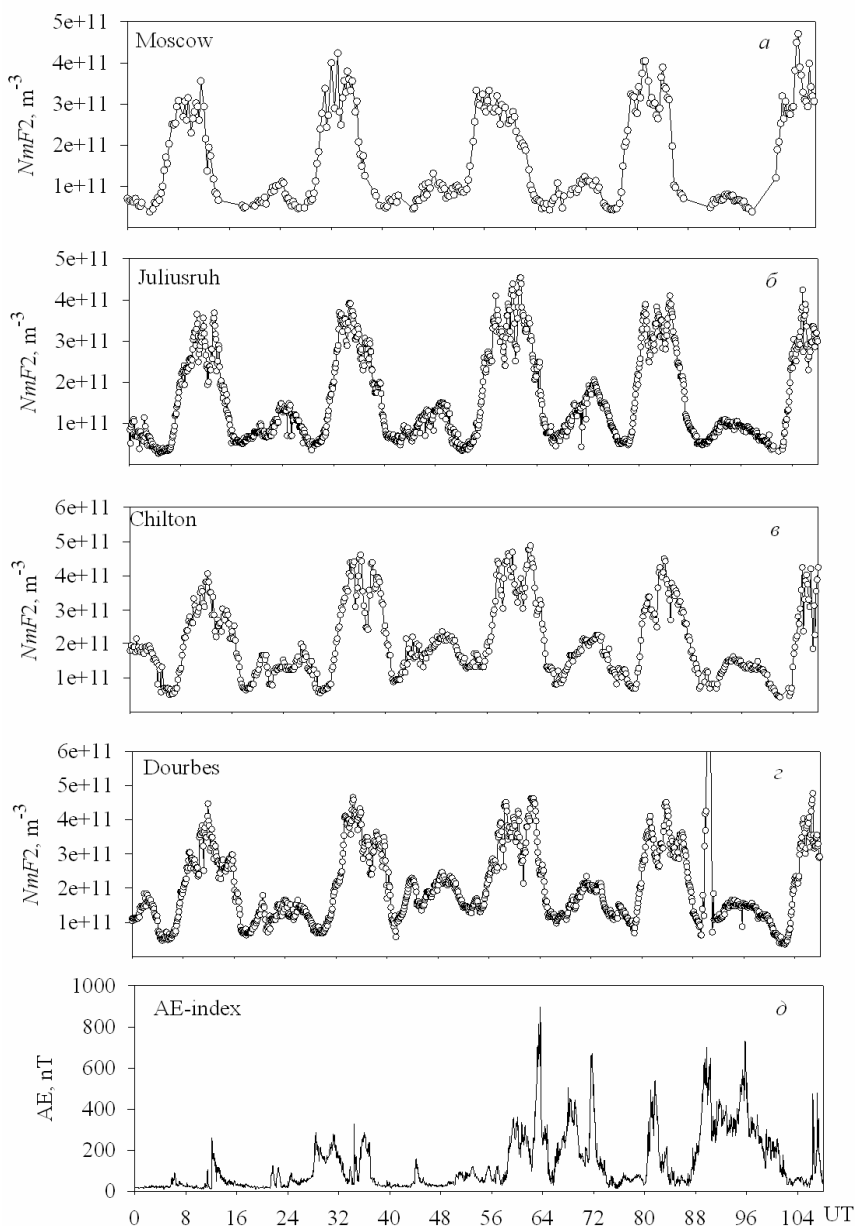


Рис. 2. Суточные и широтные вариации концентрации электронов в максимуме слоя F2 ионосферы 22 – 26 декабря 2017 г.

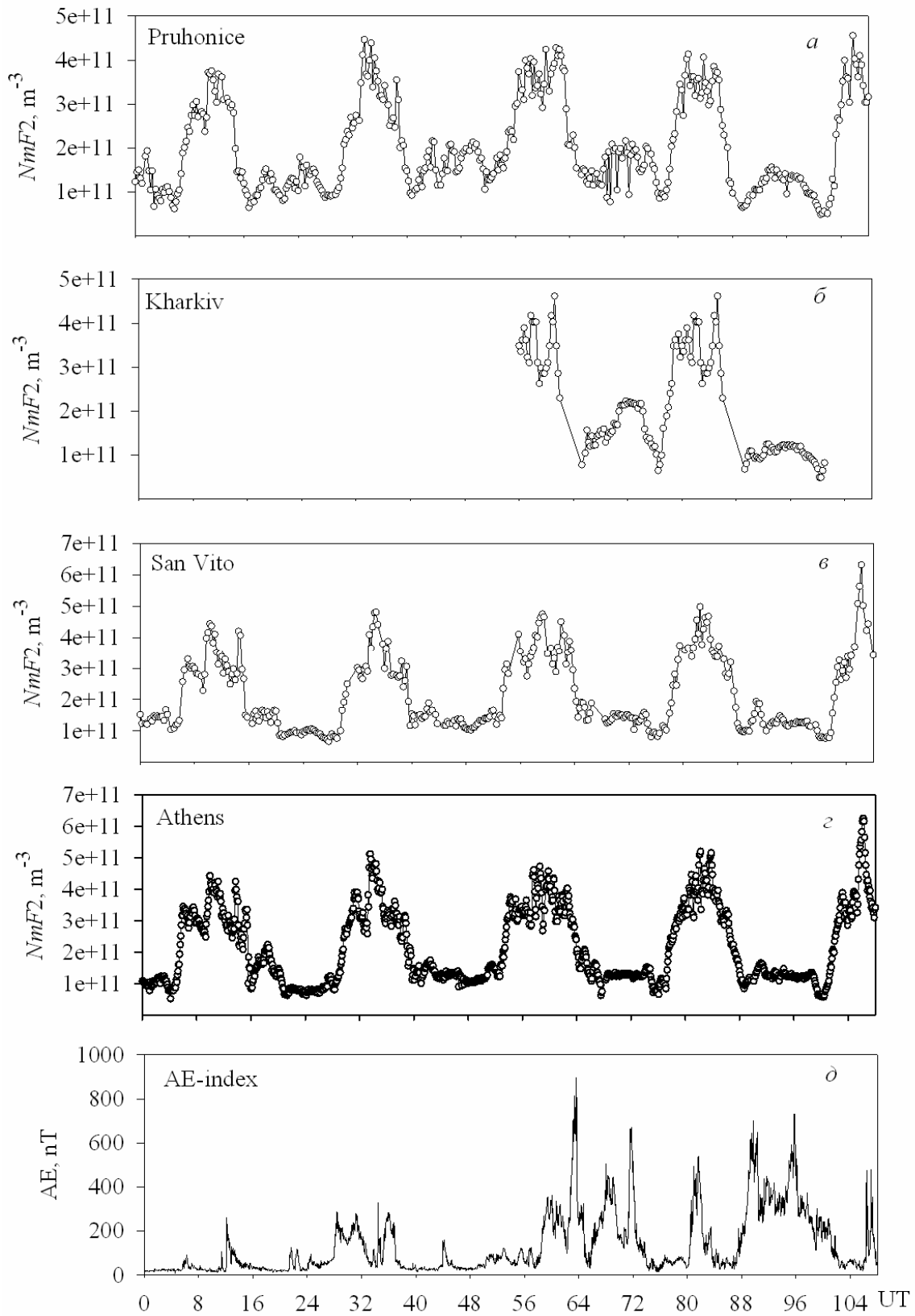


Рис. 3. Суточные и широтные вариации концентрации электронов в максимуме слоя F2 ионосферы 22 – 26 декабря 2017 г.

В работе [7] уже говорилось о том, что слабый поток из плазмосферы обусловлен выносом плазмы из магнитных силовых трубок конвекцией, вызванной проникающими магнитосферными электрическими полями в интервале времени 02:00 – 05:00 UT для 25 декабря 2017 г. Вследствие этого, в вечерние и ночные часы 25 – 26 декабря 2017 г. мы наблюдаем уменьшение значений электронной концентрации. Вероятно, это могло быть связано с тем, что магнитная силовая трубка не успела полностью заполниться с момента утреннего опустошения до вечера 25 декабря и поток ионов H^+ , который в предыдущую ночь приводил к росту $NmF2$, был ослаблен.

Что касается низких широт, то здесь стоит отметить, что более глубокая магнитосфера ($L \approx 1.56, 1.456$) не сильно подвержена влиянию слабых геомагнитных бурь. Магнитосферные электрические поля, приводящие к опустошению трубок за счёт конвекции, не проникают на такие низкие L-оболочки даже во время сильных возмущений.

Выводы.

1. Выполнен анализ суточных и широтных вариаций концентрации электронов в максимуме слоя F2 в период зимнего солнцестояния.

2. Выявлено, что для внешних магнитных силовых трубок с параметрами $L=2.129-2.671$ значения концентрации электронов в магнитоспокойный период увеличивались в ночные часы в период с 22 декабря по 24 декабря 2017 г. примерно в 1.5 раз. Предположительно основной причиной такой реакции $NmF2$ является усиление нисходящих потоков ионов H^+ из плазмосферы в ионосферу в ночные часы.

3. В результате слабой геомагнитной бури 24 декабря 2017 г. ночные значения $NmF2$, которые были получены на станциях Moscow, Juliusruh, Chilton, Dourbes, Pruhonice, Kharkiv 25 – 26 декабря 2017 г. уменьшились в 1.5 – 2 раза по сравнению со значениями концентрации для предыдущих ночей. Такой спад электронной концентрации мог быть вызван частичным опустошением магнитной силовой трубки в послебуревой период в интервале времени 02:00 – 05:00 UT 25 декабря 2017 г. и ослабленным нисходящим потоком ионов H^+ в ночные часы 25 – 26 декабря 2017 г. На более низких широтах реакция $NmF2$ на слабую геомагнитную бурю была выражена слабее и особо не повлияла на вариации электронной концентрации в максимуме слоя F2 ионосферы.

Список литературы

- Richards P. G. Seasonal and solar cycle variations of the ionospheric peak electron density: Comparison of measurement and models // *Geophysical Research*. 2001. V. 106, № A7. P. 12,803–12,819.
- Gerzen T., Jakowski N., Wilken V., Hoque M. M. Reconstruction of F2 layer peak electron density based on operational vertical total electron content maps // *Annales Geophysicae*. 2013. V. 31, № 7, P. 1241–1249. doi: 10.5194/angeo-31-1241-2013.
- Hoque M. M., Jakowski N. A new global empirical NmF2 model for operational use in radio systems // *Radio Science*. 2011. V. 46, № 6. P. 1–13. doi:10.1029/2011RS004807.

- Ma R., Xu J., Wang W., Yuan W. Seasonal and latitudinal differences of the saturation effect between ionospheric NmF2 and solar activity indices // *Geophysical Research*. 2009. V. 114. doi:10.1029/2009JA014353.
- Perna L., Pezzopane M., Ezquer R., Cabrera M., Baskaradas J.A. NmF2 trends at low and mid latitudes for the recent solar minima and comparison with IRI-2012 model // *Advances in Space Research*. 2017. V.60. P. 363–374. doi:10.1016/j.asr.2016.09.025.
- Kotov D. V., Richards P. G., Bogomaz O. V., Chernogor L. F., Truhlik V., Emelyanov L. Y., Chepurnyy Y. M., Dornin I. F. The importance of neutral hydrogen for the maintenance of the midlatitude winter nighttime ionosphere: Evidence from IS observations at Kharkiv, Ukraine, and field line interhemispheric plasma model simulations // *Journal Geophysical Research: Space Physics*. 2016. V. 121. P. 7013 – 7025. doi:10.1002/2016JA022442.
- Kotov D. V., Richards P. G., Truhlik V., Bogomaz O. V., Shulha M. O., Maruyama N., Hairston M., Miyoshi Y., Kasahara Y., Kumamoto A., Tsuchiya F., Matsuoka A., Shinohara I., Hernández-Pajares M., Dornin I. F., Zhivolup T. G., Emelyanov L. Ya., Chepurnyy Ya. M. Coincident Observations by the Kharkiv IS Radar and Ionosonde, DMSP and Arase (ERG) Satellites, and FLIP Model Simulations: Implications for the NRLMSISE-00 Hydrogen Density, Plasmasphere, and Ionosphere // *Geophysical Research Letters*. 2018. V. 45. P. 8062 – 8071. doi: 10.1029/2018GL079206.
- Digital Ionogram DataBase. URL: <http://giro.uml.edu/dibase/scaled.php> (дата обращения: 25.10.2018).
- Schunk R., Nagy. A. *Ionospheres: Physics, Plasma Physics, and Chemistry*. New York: University Press, 2009. 628 p.

References (transliterated)

- Richards P. G. Seasonal and solar cycle variations of the ionospheric peak electron density: Comparison of measurement and models // *Geophysical Research*, 2001, vol. 106, № A7, pp. 12,803–12,819.
- Gerzen T., Jakowski N., Wilken V., Hoque M. M. Reconstruction of F2 layer peak electron density based on operational vertical total electron content maps // *Annales Geophysicae*, 2013, vol. 31, № 7, pp. 1241–1249. doi: 10.5194/angeo-31-1241-2013.
- Hoque M. M., Jakowski N. A new global empirical NmF2 model for operational use in radio systems // *Radio Science*, 2011, vol. 46, № 6, pp. 1–13. doi:10.1029/2011RS004807.
- Ma R., Xu J., Wang W., Yuan W. Seasonal and latitudinal differences of the saturation effect between ionospheric NmF2 and solar activity indices // *Geophysical Research*, 2009, vol. 114. doi:10.1029/2009JA014353.
- Perna L., Pezzopane M., Ezquer R., Cabrera M., Baskaradas J.A. NmF2 trends at low and mid latitudes for the recent solar minima and comparison with IRI-2012 model // *Advances in Space Research*, 2017, vol.60, pp. 363–374. doi:10.1016/j.asr.2016.09.025.
- Kotov D. V., Richards P. G., Bogomaz O. V., Chernogor L. F., Truhlik V., Emelyanov L. Y., Chepurnyy Y. M., Dornin I. F. The importance of neutral hydrogen for the maintenance of the midlatitude winter nighttime ionosphere: Evidence from IS observations at Kharkiv, Ukraine, and field line interhemispheric plasma model simulations // *Journal Geophysical Research: Space Physics*, 2016, vol. 121, pp. 7013 – 7025. doi:10.1002/2016JA022442.
- Kotov D. V., Richards P. G., Truhlik V., Bogomaz O. V., Shulha M. O., Maruyama N., Hairston M., Miyoshi Y., Kasahara Y., Kumamoto A., Tsuchiya F., Matsuoka A., Shinohara I., Hernández-Pajares M., Dornin I. F., Zhivolup T. G., Emelyanov L. Ya., Chepurnyy Ya. M. Coincident Observations by the Kharkiv IS Radar and Ionosonde, DMSP and Arase (ERG) Satellites, and FLIP Model Simulations: Implications for the NRLMSISE-00 Hydrogen Density, Plasmasphere, and Ionosphere // *Geophysical Research Letters*, 2018. vol. 45, pp. 8062 – 8071. doi: 10.1029/2018GL079206.
- Digital Ionogram DataBase. Available at: <http://giro.uml.edu/dibase/scaled.php> (accessed: 25.10.2018).
- Schunk R., Nagy. A. *Ionospheres: Physics, Plasma Physics, and Chemistry*. New York: University Press, 2009. 628 p.

Поступила (received) 29.10.2018

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Шульга Марина Олексіївна (Шульга Марина Алексеевна, Shulha Maryna Oleksiivna) – молодший науковий співробітник, Інститут іоносфери НАН і МОН України, м. Харків; тел.: (057) 706-22-87; e-mail: marina.shulga23@gmail.com.

Котов Дмитро Володимирович (Котов Дмитрий Владимирович, Kotov Dmytro Volodymyrovych) – кандидат фізико-математичних наук, доцент, старший науковий співробітник, Інститут іоносфери НАН і МОН України, м. Харків; тел.: (057) 706-22-87; e-mail: dmitrykotoff@gmail.com.

Богомаз Олександр Вікторович (Богомаз Александр Викторович, Bogomaz Oleksandr Viktorovych) – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, Інститут іоносфери НАН і МОН України, м. Харків; тел.: (057) 706-22-87; e-mail: o.v.bogomaz1985@gmail.com.

УДК 53.088.6:550.388, 621.396

А. В. БОГОМАЗ, Д. В. КОТОВ, Д. А. ИСКРА

РЕЗУЛЬТАТЫ ПРОВЕРКИ НОВОГО ПРОГРАММНО-АППАРАТНОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ РАДАРА НЕКОГЕРЕНТНОГО РАССЕЙНИЯ В РЕЖИМЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СРЕДНЕЙ ИОНОСФЕРЫ

Представлены результаты экспериментальной проверки разработанного программно-аппаратного комплекса для обработки данных харьковского радара некогерентного рассеяния в режиме зондирования ионосферы сдвоенными импульсами малой длительности и с переменным расстоянием между ними. Описаны условия эксперимента. Представлен интерфейс разработанной программы, с помощью которой были получены экспериментальные данные. Охарактеризованы полученные во время эксперимента данные и дано описание их формата. Представлен алгоритм, использовавшийся для калибровки шкалы высот. Показаны этапы обработки данных (расчёт автокорреляционных функций принятого радаром и перенесенного на видеочастоту сигнала, устранение когерентных помех от спутников и космического мусора, временное усреднение, высотное усреднение, учёт характеристики восстановления газовых разрядников антенного коммутатора радара, расчёт автокорреляционной функции шума и получение автокорреляционной функции сигнала некогерентного рассеяния, решение обратной задачи рассеяния) с результатами их выполнения. Представлено сравнение оценок параметров ионосферной плазмы, полученных с помощью нового программно-аппаратного комплекса, с оценками, полученными с помощью действующей системы обработки данных (аппаратно-программный комплекс «КЕНТАВР»), и результатами моделирования с использованием международной справочной модели ионосферы IRI-2016.

Ключевые слова: ионосфера, радар некогерентного рассеяния, аналого-цифровое преобразование, обработка данных, система обработки данных, база данных, разработка программного обеспечения.

О. В. БОГОМАЗ, Д. В. КОТОВ, Д. О. ИСКРА

РЕЗУЛЬТАТИ ПЕРЕВІРКИ НОВОГО ПРОГРАМНО-АППАРАТНОГО КОМПЛЕКСУ ДЛЯ ОБРОБКИ ДАНИХ РАДАРА НЕКОГЕРЕНТНОГО РОЗСІЯННЯ В РЕЖИМІ ДОСЛІДЖЕННЯ СЕРЕДНЬОЇ ІОНОСФЕРИ

Представлено результати експериментальної перевірки розробленого програмно-апаратного комплексу для обробки даних харківського радара некогерентного розсіяння в режимі зондування іоносфери здвоєними імпульсами малої тривалості та зі змінною відстанню між ними. Описано умови експерименту. Представлено інтерфейс розробленої програми, за допомогою якої отримано експериментальні дані. Охарактеризовано отримані під час експерименту дані та надано опис їхнього формату. Представлено алгоритм, що використовувався для калібрування шкали висот. Показано етапи обробки даних (розрахунок автокореляційних функцій прийнятого радаром та перенесеного на відеочастоту сигналу, усунення когерентних завад від супутників та космічного сміття, часове усереднення, врахування характеристики відновлення газових розрядників антенного комутатора радара, розрахунок автокореляційної функції шуму та отримання автокореляційної функції сигналу некогерентного розсіяння, розв'язання оберненої задачі розсіяння) з результатами їх виконання. Представлено порівняння оцінок параметрів іоносферної плазми, отриманих за допомогою нового програмно-апаратного комплексу, з оцінками, отриманими за допомогою діючої системи обробки даних (апаратно-програмний комплекс «КЕНТАВР»), та результатами моделювання з використанням міжнародної довідкової моделі іоносфери IRI-2016.

Ключові слова: іоносфера, радар некогерентного розсіяння, аналого-цифрове перетворення, обробка даних, система обробки даних, база даних, розробка програмного забезпечення.

O. V. BOGOMAZ, D. V. KOTOV, D. O. ISKRA

RESULTS OF TESTING NEW HARDWARE AND SOFTWARE SYSTEM FOR PROCESSING DATA OBTAINED BY INCOHERENT SCATTER RADAR OPERATING IN THE MODE FOR MIDDLE IONOSPHERE RESEARCH

The results of the experimental testing of a new data processing system for Kharkiv incoherent scatter radar are presented. Experimental conditions are described. Graphical user interface of the developed program for experimental data acquisition is described. The data obtained during the experiment are characterized and the description of their format is given. An algorithm for height scale calibration is presented. The stages of data processing (calculating autocorrelation function of the received signal; noise removing; temporal averaging; taking into account a recovery characteristic of the antenna switcher; calculating autocorrelation functions of noise and incoherent scatter signal; inverse problem solving) with the results of their implementation are shown. A comparison of the estimates of ionosphere plasma parameters obtained using the new data processing system with the estimates obtained using the current one ("KENTAVR") and the simulation results using the IRI-2016 model is presented.

Keywords: ionosphere, incoherent scatter radar, analog-to-digital conversion, data processing, data processing system, database, software development.

Введение. Для исследования средней ионосферы (т.е. на высотах вблизи максимума области F2) на харьковском радаре применяется режим зондирования сдвоенными импульсами длительностью 135 мкс с изменяющимся расстоянием между ними (так называемый «4-й режим»). Это позволяет улучшить высотное разрешение (до 20 км) в сравнении с режимами зондирования простыми импульсами большой длительности (795 в 1-м режиме или 663 мкс в 12-м режиме) [1–3].

Измерения в режиме зондирования сдвоенными импульсами проводились в период с 1999 по 2004 г. [4], а в 2017 г. была начата работа по разработке нового программно-аппаратного комплекса для обработки данных, получаемых при работе радара в этом режиме. Необходимость разработки связана с тем, что аппаратное и программное обеспечение системы обработки данных харьковского радара НР, которая используется во время его работы в режиме зондирования короткими

© А. В. Богомаз, Д. В. Котов, Д. А. Искра, 2018

Вісник Національного технічного університету «ХПІ».
Серія: Радіофізика та іоносфера, № 43 (1319) 2018

импульсами, были разработаны ещё в середине 1990-х годов [5]. Это означает, что, во-первых, из-за небольшой вычислительной мощности компьютерной системы необходимо искусственно занижать точность вычислений для улучшения временных показателей (система должна работать в режиме реального времени). Во-вторых, даже несмотря на улучшение временных характеристик, необходимо выполнять горизонтальное масштабирование системы (используется 3 компьютера, соединённых в одну сеть: первый компьютер обрабатывает данные для получения температуры и ионного состава плазмы, второй – для получения вертикальной составляющей скорости движения плазмы, третий компьютер выступает в роли сервера, на котором происходит накопление данных). И наконец, с длительным сроком эксплуатации системы связано увеличение количества её аппаратных сбоев.

В ходе разработки нового программно-аппаратного комплекса для обработки данных в 4-м режиме в качестве устройства сбора данных был выбран модуль аналого-цифрового преобразования (АЦП) E20-10 [6], а также было спроектировано, изготовлено и протестировано устройство, имитирующее сигналы синхронизации системы обработки данных с другими системами радара [7]. Применение этого устройства позволило отладить программное обеспечение для сбора данных.

Первая проверка работы программно-аппаратного комплекса в составе харьковского радара НР была проведена 26.12.2017 г. [8].

Целью этой работы является представление результатов обработки данных, полученных во время эксперимента, и методик, с помощью которых производилась обработка.

Условия эксперимента. Эксперимент начался в 09:31 по восточно-европейскому времени (ЕЕТ = UT + 2) – примерно через 30 мин после окончания плановых (близких ко дню зимнего солнцестояния) измерений параметров ионосферы в 12-м режиме работы радара (рис. 1). Значения геомагнитного индекса K_p , усреднённого на интервале 3 ч, во время эксперимента и в предыдущий день не превышали 3 [9]. Конфигурация радиоприёмного устройства после переключения радара с 12-го режима осталась без изменений. Ширина полосы пропускания приёмного тракта, определяемая в основном фильтрами нижних частот (ФНЧ), установленными после синхронных детекторов, $\Delta f \approx 9,5$ кГц. Эксперимент продолжался до 10:32 ЕЕТ.

Аппаратное и программное обеспечение. Аппаратная составляющая комплекса основана на модуле АЦП E20-10, подключаемому к высокопроизводительному персональному компьютеру по шине USB. Модуль имеет 4 коммутируемых аналоговых входа, из которых в данной конфигурации задействовано 3 – для синфазной и квадратурной компонент принятого сигнала, поступающих с выходов синхронного

детектора, и цифрового сигнала R_0 [7]. Сигнал R_0 – напряжение уровня логической «1» (ТТЛ), присутствующее в течение всей радиолокационной развёртки при зондировании ионосферы одиночным импульсом, и напряжение уровня логического «0» во время зондирования ионосферы парными импульсами.

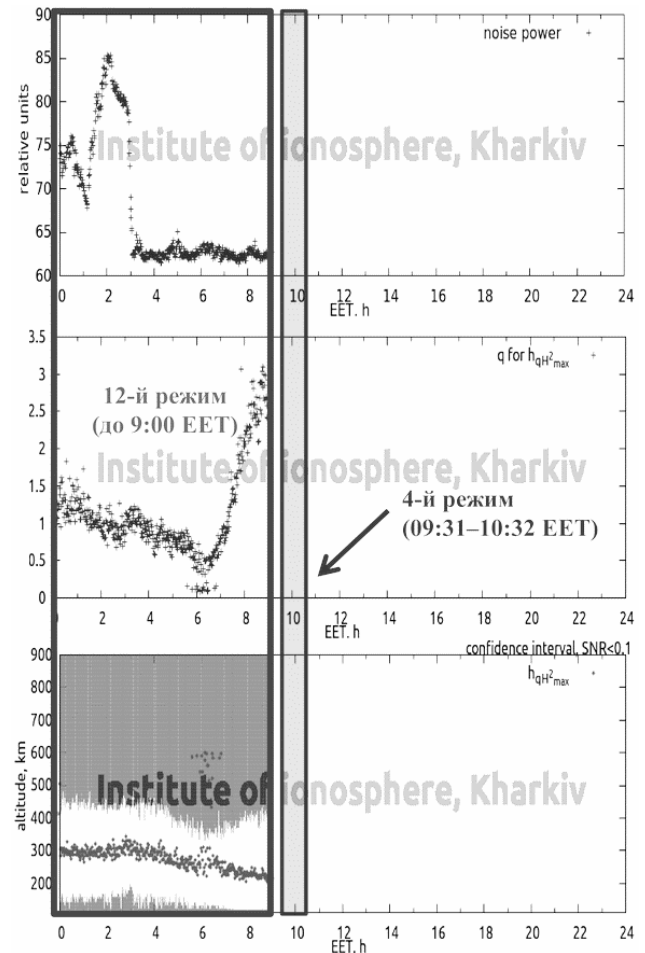


Рис. 1. Время проведения эксперимента по проверке нового программно-аппаратного комплекса для обработки данных при работе харьковского радара НР в 4-м режиме и помеховая обстановка до эксперимента (при работе радара в 12-м режиме). На верхней панели показана временная зависимость мощности космических и собственных шумов, которые присутствуют в данных, на средней – отношение сигнал/шум q на высоте максимума сечения рассеяния qh^2 , на нижней – высота максимума сечения рассеяния и область высот, где данным доверять нельзя из-за малого отношения сигнал/шум ($q < 0.1$).

Для обеспечения функции сбора данных была разработана соответствующая программа. Внешний вид её интерфейса показан на рис. 2.

Главное окно программы (рис. 3) включает следующие элементы (сверху вниз): текстовое поле, в котором отображается служебная информация о состоянии модуля E20-10, три текстовых поля, в которые пользователем вводятся параметры записи радиолокационных развёрток (основной параметр – количество наборов из 7 развёрток, записываемых в

файл; рекомендуется либо 209, что при частоте следования зондирующих импульсов 24.4 Гц соответствует 1-минутному сеансу сбора данных, либо 314, что соответствует сеансу продолжительностью 1.5 мин), индикатор выполнения (progressbar), показывающий, какая часть данных в текущем сеансе собрана, флажок (checkbox), открывающий и закрывающий дополнительное окно с визуализацией сигналов, а также кнопку, нажатие на которую запускает или останавливает (в зависимости от текущего состояния программы) сбор данных. Запуск потока программы, отвечающего за сбор данных, может осуществляться как непосредственно после нажатия на кнопку «Старт» (при этом заголовок кнопки меняется на «Стоп»), так и с начала следующей минуты.

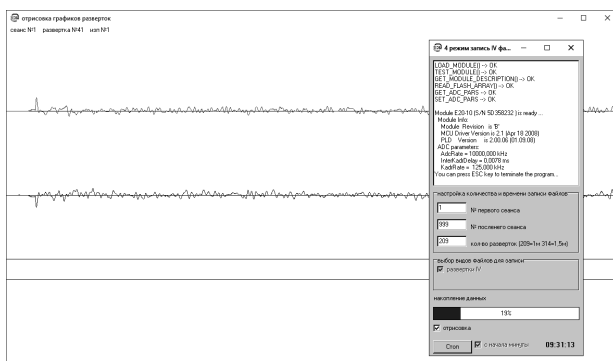


Рис. 2. Интерфейс разработанной программы сбора данных, входящая в состав программно-аппаратного комплекса для обработки данных радара некогерентного рассеяния в режиме исследования средней ионосферы

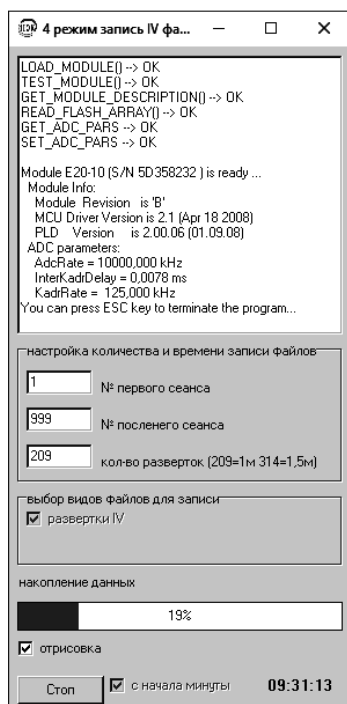


Рис. 3. Главное окно программы сбора данных

Разработанная для 4-го режима работы радара программа сбора данных поддерживает один формат выходных файлов (в отличие от программы для 12-го режима). Структура файла показана на рис. 4. Файл содержит заголовок с информацией о сеансе, за которым следуют данные, представляющие оцифрованные мгновенные значения сигналов синфазной и квадратурной компоненты принятого и перенесенного на видеочастоту сигнала.

После анализа оцифрованного сигнала R_0 , поданного на третий вход модуля АЦП, радиолокационные развертки, во время которых излучается одиночный зондирующий импульс (для получения мощности сигнала), помечаются маркером «1», остальные развертки – маркером «0».

Исходные данные для анализа. Во время эксперимента 26.12.2017 г. работали следующие системы обработки:

1. Система обработки на базе модуля E20-10, работающая под управлением новой программы обработки.

2. Аппаратно-программный комплекс (АПК) «КЕНТАВР», функционирующий в составе харьковского радара НР с 1996 г.

В результате эксперимента было получено 62 файла с данными, сформированные новой программой обработки. Размер каждого файла – около 14 Мбайт, суммарный объем данных – 865 Мбайт. Интервал дискретизации – 8 мкс (что соответствует шагу по высоте около 1.2 км), количество точек в развертке – 2500 (что соответствует максимальной дальности около 3000 км).

С помощью программного обеспечения АПК «КЕНТАВР» было получено 38 файлов, содержащих усредненные в течение 1.5 мин корреляционные функции (КФ) принятого с 360 высотных участков сигнала, и 38 файлов с результатами их экспресс-обработки (суммарный объем данных – 0.8 и 1.1 Мбайт соответственно). Детальное сравнение исходных данных представлено в табл. 1.

Анализ данных. Данные, полученные с помощью АПК «КЕНТАВР», были обработаны в одноименном пакете программ. Обработка заключалась в фильтрации когерентных помех, получению КФ НР сигнала и временному их усреднению на интервале 30 мин, решению по автокорреляционным функциям (АКФ) НР сигнала обратной задачи рассеяния. Была выполнена оценка таких параметров ионосферной плазмы, как температуры ионов и электронов, относительное содержание ионов различных сортов (атомарного кислорода O^+ , атомарного водорода H^+ , гелия He^+ и тяжелых молекулярных ионов O_2^+ и NO^+ , неразличимых в методе НР из-за близких значений их масс и обозначаемых как M^+), вертикальная составляющая скорости движения плазмы. Таким образом, получены 2 высотных профиля параметров (для моментов времени 10:00 ЕЕТ и 10:30 ЕЕТ), имеющих хорошее согласие с результатами

моделирования, проведенного с использованием IRI-2016 [10].
международной справочной модели ионосферы

Заголовок	
01 00 00 00 4 байта	Версия (1)
Г Г Г Г - М М - Д Д 20(пробел) Ч Ч : м м : С С 00 20 байт	Дата (в формате ASCII)
D1 00 00 00 4 байта	Количество развёрток N_d (209 (209*7= 1463))
C4 09 00 00 4 байта	Количество точек в развёртке N_h (2500)
08 00 00 00 4 байта	Интервал дискретизации в мкс (8 (7.8 мкс + время на коммутацию каналов))
00 00 4 байта	Зарезервировано 44 байта
00 00 44 байта	
Размер заголовка: 4+20+4+4+4+44 = 80 байт	
Данные	
1 A ₁ [1] A ₁ [2] A ₁ [N _h]	B ₁ [1] B ₁ [2] B ₁ [N _h]
0 2500 * 2 байта	
0 A ₂ [1] A ₂ [2] A ₂ [N _h]	B ₂ [1] B ₂ [2] B ₂ [N _h]
.....
0 A _{N_d} [1] A _{N_d} [2] A _{N_d} [N _h]	B _{N_d} [1] B _{N_d} [2] B _{N_d} [N _h]
Размер данных: (1*7*209)+(2*2*2500*7*209)=1463 + 14630000 = 14 631 463 байта	
Размер файла: 80 + 14631463 = 14 631 543 байта	
Имя файла: ГГГ-ММ-ДД_ЧЧ-мм-СС.ИВ	

Рис. 4. Формат файла для записи и хранения радиолокационных развёрток, полученных во время работы харьковского радара в режиме сдвоенных импульсов (4-й режим)

Таблица 1. Сравнение исходных данных, полученных во время эксперимента, проведенного 26.12.2017 г. на харьковском радаре НР

Критерий сравнения	Старая программа первичной обработки данных («Кентавр»)	Результаты экспресс-обработки данных, полученных с помощью старой программы первичной обработки данных	Новая программа первичной обработки данных
Вид информации	КФ принятого сигнала	КФ сигнала НР, АКФ шума, оценки параметров ионосферы	Мгновенные значения принятого сигнала
Шаг по высоте	9.8 км	9.8 км	1.2 км
Количество высотных участков	360	98	2500
Длительность сеанса	90 с	90 с	60 с
Размер одного файла	21.1 кбайт	29.6 кбайт	14.3 Мбайт
Количество файлов	38	38	62
Общий объём данных	0.8 Мбайт	1.1 Мбайт	865.1 Мбайт

Обработка данных, полученных с помощью новой системы, производилась путём внедрения поддержки формата файлов и модифицирования алгоритмов, реализованных в разрабатываемой на языке программирования *Java* программе UPRISE2 [11]. Для получения конечного результата – оценок параметров ионосферной плазмы – необходимо [12–14]:

- рассчитать КФ принятого и перенесенного на видеочастоту сигнала;
- выполнить фильтрацию присутствующих в данных помех;
- произвести временное и высотное усреднение КФ;
- рассчитать КФ НР сигнала;
- учесть аппаратные особенности радара;
- решить обратную задачу рассеяния.

Кроме этого необходимо выполнить калибровку шкалы высот, т.е. в формуле

$$h = h_0 + \Delta h \cdot i_h, \quad (1)$$

где h – высота (в км), h_0 – начальная высота (в км), соответствующая нулевому высотному участку, Δh – шаг по высоте (в км), связанный с частотой дискретизации сигнала и особенностями записи данных в файл, i_h – номер высотного участка, необходимо определить константу h_0 . Константа Δh в данном случае однозначно определяется частотой дискретизации $f_d = 8$ мкс и равна 1.2 км.

Для определения h_0 был проведен анализ взаимного расположения во времени сигнала синхронизации системы обработки данных и сигнала, содержащего импульсы запуска передатчика, в ходе

которого была оценена задержка между ними. Её величина составила около 640 мкс, что с учётом длительности импульса позволила получить достаточно точную оценку h_0 .

Дополнительно было произведено уточнение h_0 по методике, описанной в [15]. Она заключается в следующем. Выбирается космический объект, находящийся на низкой околоземной орбите. Зная параметры орбиты, можно рассчитать время и высоту пролёта этого объекта над радаром. Таким образом, попадая в диаграмму направленности радара, объект отражает зондирующие сигналы, формируя на радиолокационной развёртке отклик длительностью примерно равной длительности зондирующего импульса. Т.к. высота объекта известна, то она приписывается середине импульса когерентного отражения (в методе НР цель – распределённая в пространстве, занимаемом излучаемым импульсом).

К сожалению, пролёта над харьковским радаром НР Международной космической станции во время эксперимента не было (а именно по ней производилась калибровка высоты в 12-м режиме), был произведен поиск других объектов.

Из каталога спутников и космического мусора [16] с помощью программы на языке *Python*

были отфильтрованы низкоорбитальные спутники, находящиеся на орбите во время эксперимента. Всего было выбрано 3086 объектов. С помощью сервиса [17] были получены параметры их орбит для интервала времени 07:30–08:30 UT (в формате TLE), а затем с помощью программы *Orbitron* [18] рассчитаны моменты пролётов объектов над антенной радара.

Из всех пролётов были выбраны такие, которые могли вызвать когерентное отражение от объекта во время попадания его в главный лепесток диаграммы направленности (ДН). С учётом того, что ширина ДН антенны НДА-100 по половинной мощности $2\theta_{0,5P}$ составляет $1.1^\circ-1.2^\circ$ [19], были отфильтрованы такие пролёты объектов, когда угол места был не менее 89.4° . Результаты сведены в табл. 2. Таким образом, удалось идентифицировать 5 объектов (рис. 5). Зафиксированное время пролёта совпадало с рассчитанным, а найденные с помощью программы *Orbitron* высоты позволили скорректировать значение константы h_0 . Формула (1) при этом приобретает вид

$$h = -120 + 1.2 \cdot i_h.$$

Таблица 2. Параметры пролётов идентифицированных спутников над антенной НДА-100 харьковского радара НР в период 07:30–08:30 UT 26.12.2017 г.

Время пролёта (UT/ЕЕТ)	Идентификатор объекта (согласно каталогу NORAD)	Название объекта	Эффективная площадь рассеяния, м ²	Угол места, град.	Дистанция, км
07:36/09:36	727	THOR AGENA D R/B	7.525	89.5	915
07:46/09:46	21784	COSMOS 2170	1.113	89.6	1418
07:46/09:46	25634	ARGOS	7.4694	89.5	838
07:54/09:54	26385	TZINGHUA 1	0.4926	89.7	683
08:27/10:27	8709	UME 1 (ISS 1)	1.3849	89.4	1005

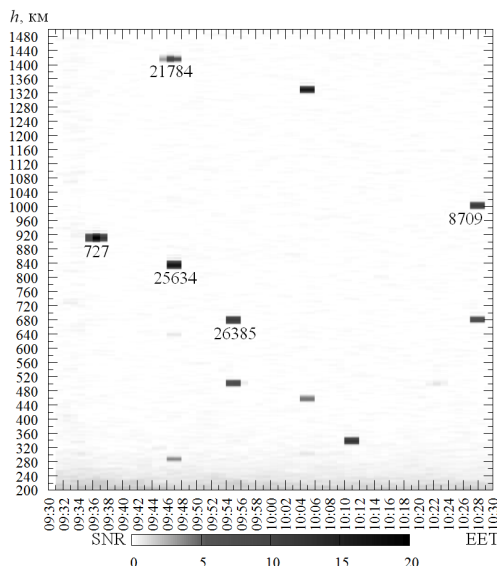


Рис. 5. Высотно-временная зависимость отношения сигнал/шум (signal-to-noise ratio, SNR) с когерентными отражениями от космических объектов, 5 из которых были идентифицированы

Расчёт КФ принятого с высоты h и перенесенного на видеочастоту сигнала можно описать формулой

$$R(h, \tau) = \sum_{i=1}^N x(h)x(h - c\tau), \quad (2)$$

где x – мгновенное значение сигнала, τ – задержка КФ, c – скорость света, N – количество радиолокационных развёрток в сеансе измерений.

С учётом интервала дискретизации $\Delta t = 8$ мкс и дискреты значений задержек $\Delta \tau = 40$ мкс, для которых рассчитывается КФ, формула (2) приобретает вид:

$$R(i_h, i_\tau) = \sum_{i=1}^N x(i_h)x(i_h - 5i_\tau),$$

где $i_\tau \in \{0, 7, 8, 9, 10, 11, 12\}$ – индекс задержки КФ, $i_h \in [i_\tau, 2500)$ – индекс высотного участка.

При использовании синфазной и квадратурной составляющих сигнала (x_I и x_Q соответственно) и учёте постоянной составляющей в каждом из выходов

синхронного детектора, КФ рассчитывается по формуле:

$$R(i_h, i_\tau) = \sum_{i=1}^N x_I(i_h) x_I(i_h - 5i_\tau) + \sum_{i=1}^N x_Q(i_h) x_Q(i_h - 5i_\tau) - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_I(i_h) \sum_{i=1}^N x_I(i_h - 5i_\tau) - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_Q(i_h) \sum_{i=1}^N x_Q(i_h - 5i_\tau). \quad (3)$$

Полученные по формуле (3) значения КФ принятого сигнала программа UPRISE2 помещает в проект, который представляет собой базу данных (БД). В качестве системы управления базами данных используется *SQLite* [20]. Результаты каждого этапа обработки заносятся в отдельные таблицы, имеющие одинаковую структуру:

```
CREATE TABLE `step1` (
  `id`      INTEGER PRIMARY KEY
            AUTOINCREMENT,
  `time`   DATETIME,
  `alt`    INT,
  `lag`    INT,
  `value`  DOUBLE
);
```

В программе реализованы запросы для получения КФ сигнала на заданной высоте и указанный момент времени t_c $R(t_c = \text{const}, i_h = \text{const}, i_\tau = \text{var})$, высотного профиля КФ для заданной задержки времени в указанный момент времени $R(t_c = \text{const}, i_h = \text{var}, i_\tau = \text{const})$, временной зависимости КФ для заданной задержки на определённой высоте $R(t_c = \text{var}, i_h = \text{const}, i_\tau = \text{const})$.

На каждой из высот i_h для каждой задержки i_τ поочередно из БД запрашивались временные зависимости значений КФ, к которым затем применялись процедура идентификации когерентных помех, основанная на использовании скользящего окна с адаптивным расчётом порога на каждом шаге, и процедура усреднения на заданном временном интервале. Алгоритмы идентификации помех и временного усреднения данных описаны в [14]. Примеры выполнения этих процедур показаны на рис. 6. Временные зависимости мощности принятого сигнала $P(t_c, i_h) = R(t_c, i_h, i_\tau = 0)$ на высотах 300 км и 840 км после устранения когерентных помех (например, на высоте 840 км в 09:46 ЕЕТ зафиксирован пролёт спутника ARGOS) данные были усреднены на интервале 30 мин.

Следующими этапами обработки были:

- высотное усреднение КФ на интервале, занимаемом коррелирующим объёмом плазмы, который в 4-м режиме работы радара практически полностью определяется длительностью зондирующего импульса;

- вычитание шума, КФ которого определяется как КФ сигнала, принятого с высот, где мощность полезного, НР, сигнала настолько мала, что ею можно пренебречь;

- учёт характеристики восстановления газовых разрядников антенного коммутатора, который после окончания излучения зондирующего импульса переключает антенну НДА-100 с передатчика на приёмник.

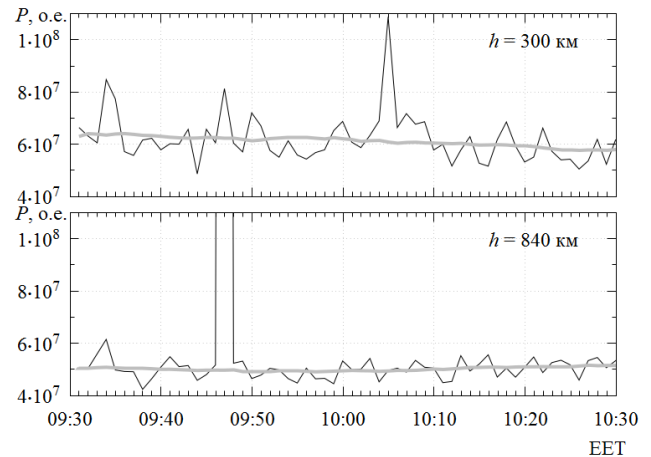


Рис. 6. Временные зависимости мощности принятого с высот 300 км и 840 км сигнала (тонкие тёмные линии), а также результаты их фильтрации от когерентных помех и усреднения (светлые линии) в относительных единицах (о. е.)

КФ шума рассчитывается в диапазоне высот 2160–2520 км (индексы высот $i_{H_{\min}} = 1900$, $i_{H_{\max}} = 2200$) по формуле:

$$R_N(i_\tau) = \frac{1}{i_{H_{\max}} - i_{H_{\min}}} \sum_{i_h=i_{H_{\min}}}^{i_{H_{\max}}-1} R(i_\tau, i_h).$$

Полученная в 4-м режиме АКФ шума хорошо согласуется с АКФ шума, полученной в 12-м режиме работы радара (рис. 7).

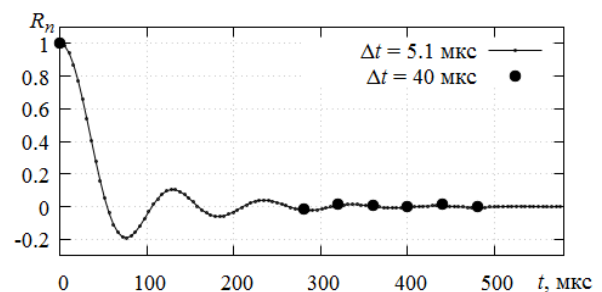


Рис. 7. Нормированные АКФ шума, полученные в 12-м и 4-м режимах работы харьковского радара НР (ФНЧ использовались одни и те же)

Так как в 4-м режиме между парой импульсов, излучаемых на несущей частоте $f_0 = 158$ МГц, излучается сигнал на сдвинутой частоте $f_1 = f_0 + 0.1$ МГц [3], можно считать реакцию разрядников на излучаемый сигнал такой же, как и при работе в 12-м режиме. Поэтому при учёте аппаратных особенностей радара во время обработки данных эксперимента, проведенного 26.12.2017 г., использовалась характеристика восстановления разрядников антенного коммутатора r , измеренная во время эксперимента 29.12.2014 г., который проводился в 12-м режиме работы радара. Характеристика была интерполирована с шагом 8 мкс (рис. 8), а затем на участке $i_h \in (187, 600)$ аппроксимирована полиномом 6-й степени:

$$r(i_h) = \sum_{j=0}^6 a_j i_h^j,$$

где $a_0 = -4.7499283$, $a_1 = 1.8853600 \cdot 10^{-2}$,
 $a_2 = 2.1625741 \cdot 10^{-4}$, $a_3 = -1.592397 \cdot 10^{-6}$,
 $a_4 = 4.2045693 \cdot 10^{-9}$, $a_5 = -5.0407075 \cdot 10^{-12}$,
 $a_6 = 2.306279 \cdot 10^{-15}$.

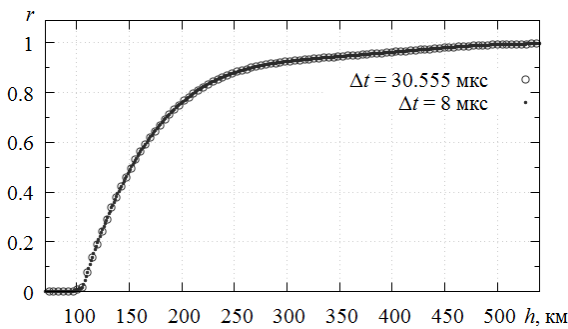


Рис. 8. Характеристика восстановления разрядников антенного коммутатора

Абсолютная погрешность при аппроксимации $D = r_c - r$ (где r_c и r – аппроксимированная и измеренная характеристики восстановления разрядников соответственно) показана на рис. 9.

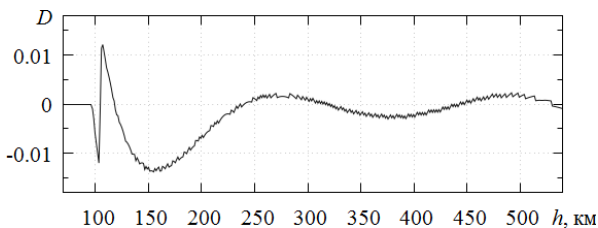


Рис. 9. Абсолютная погрешность при аппроксимации характеристики восстановления разрядников антенного коммутатора харьковского радара НР

Учёт характеристики восстановления r осуществляется по формуле:

$$R^*(i_\tau, i_h) = \frac{R(i_\tau, i_h)}{\sqrt{r(i_h)r(i_h - i_\tau)}}.$$

На рис. 10 показаны высотные профили мощности принятого сигнала после высотного усреднения по 5 точкам и учёта характеристики восстановления разрядников (тёмная линия) и НР сигнала, т.е. после вычитания мощности шума (светлая линия).

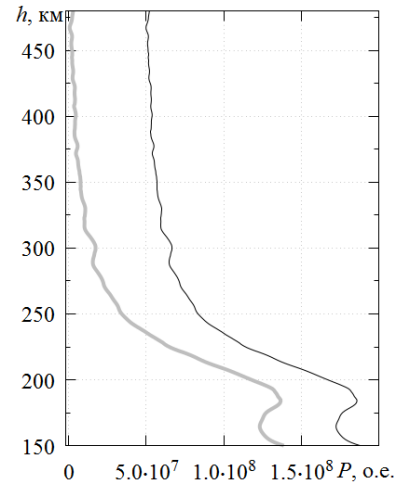


Рис. 10. Высотные профили мощности принятого сигнала до (тонкая тёмная линия) и после (светлая линия) вычитания шума

АКФ НР сигнала, принятого с разных высот, показаны на рис. 11. Они могут использоваться для решения обратной задачи рассеяния, т.е. оценки параметров ионосферной плазмы [11, 21].

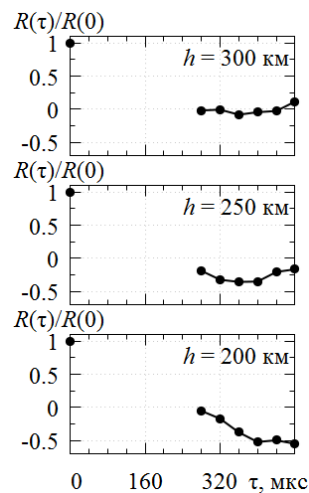


Рис. 11. Нормированные АКФ НР сигнала, принятого с высот 200, 250 и 300 км

Был реализован поиск температур среди решений в диапазоне 500–3000 К с шагом 10 К для высоты 250 км. Плазма считалась однокомпонентной (относительное содержание ионов O^+ – 100 %).

Согласно модели IRI-2016 относительное содержание ионов атомарного кислорода в 09:30 составляло 95.2 %, по результатам обработки данных с помощью программы «КЕНТАВР» – 100 %. Результат решения обратной задачи рассеяния показан на рис. 12.

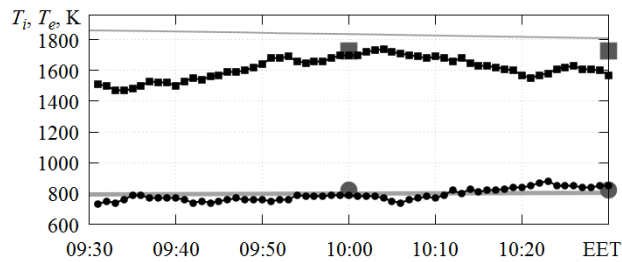


Рис. 12. Температуры ионов T_i и электронов T_e ($T_e > T_i$): согласно модели IRI-2016 (светлые линии), полученные с помощью программы АПК «КЕНТАВР» (большие круги и квадраты) и полученные с помощью нового программно-аппаратного комплекса и программы UPRISE2 (маленькие круги и квадраты)

Выводы. Проведенный 26.12.2017 г. эксперимент на харьковском радаре НР позволил проверить работу нового программно-аппаратного комплекса для обработки данных для режима

Список литературы

1. Рогожкин Е. В. *Зондирующие сигналы для исследования ионосферы методом некогерентного рассеяния*: монография / Е. В. Рогожкин, В. А. Пуляев, В. Н. Лысенко. – Х: НТУ «ХПИ», 2008. – 256 с.
2. Головин В. И. Наблюдения ионосферы с помощью метода некогерентного рассеяния. Сообщение 2. Аппаратурные и методические особенности / В. И. Головин, Е. В. Рогожкин, В. И. Таран, С. В. Черняев // *Вестник Харьковского политехнического института. Исследование ионосферы методом некогерентного рассеяния*. – 1979. – №155. – С. 12–22.
3. Domin I. F. Kharkiv incoherent scatter facility / I. F. Domin, Ya. M. Cherpurnyy, L. Ya. Emelyanov, S. V. Chernyaev, A. F. Kononenko, D. V. Kotov, O. V. Bogomaz, D. A. Iskra // *Bulletin of the National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute". Series: Radiophysics and Ionosphere*. – 2014. – № 47 (1089). – P. 28–42.
4. Сюсюк М. Н. Особенности исследования средней ионосферы методом некогерентного рассеяния / М. Н. Сюсюк // *Вестник Национального технического университета «Харьковский политехнический институт»*. – 2013. – №33 (1066) – С. 62–65.
5. Цуркан А. В. Двухимпульсный режим радара некогерентного рассеяния / А. В. Цуркан // *Вестник Харьковского государственного политехнического университета*. – Харьков. – 1999. – Вып. 31. – С. 120–123.
6. Искра Д. А. Повышение точности определения автокорреляционных функций сигнала некогерентного рассеяния / Д. А. Искра // *Вестник Национального технического университета «Харьковский политехнический институт»*. – №33 (1066) – 2013. – С. 34–37.
7. Богомаз А. В. Синхронизация системы обработки данных радара некогерентного рассеяния в режиме исследования средней ионосферы / А. В. Богомаз, Д. А. Искра, А. Ф. Кононенко // *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Радіофізика та іоносфера*. – 2017. – № 47 (1268). – С. 16–19.
8. Богомаз А. В. Проверка новой программы обработки данных харьковского радара некогерентного рассеяния в режиме исследования средней ионосферы / А. В. Богомаз, Д. А. Искра, А. Ф. Кононенко // *Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: тези доповідей XXVI міжнародної науково-практичної конференції MicroCAD-2018, 16-18 травня 2018р.: у 4 ч. Ч. III. / за ред. проф. Сокола Є.І.* – Харків: НТУ «ХПІ». – С. 304.
9. [ftp://ftp.swpc.noaa.gov/pub/indices/old_indices/2017_DGD.txt](http://ftp.swpc.noaa.gov/pub/indices/old_indices/2017_DGD.txt)
10. Bilitza D. International Reference Ionosphere 2016: From ionospheric climate to real-time weather predictions / D. Bilitza, D. Altadill, V. Truhlik, V. Shubin, I. Galkin, B. Reinisch, X. Huang // *Space Weather*, N 15. – P. 418–429. – 2017, doi:10.1002/2016SW001593.
11. Bogomaz O. Advances in software for analysis of Kharkiv incoherent scatter radar data / O. Bogomaz, D. Kotov, S. Panasenko, L. Emelyanov // *2017 IEEE International conference of information-telecommunication technologies and radio electronics (UkrMiCo'2017) / Materials of scientific and technical conference*. – Kyiv: Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, 2017 – P. 531–535.
12. Богомаз А. В. Этапы обработки данных радара некогерентного рассеяния / А. В. Богомаз // *Конференція молодих учених «Дистанційне радіозондування іоносфери (ІОН-2012)» (Харьков, Україна, 18 – 20 квітня 2012 р.)*. – Сборник тезисов. – 2012. – С. 7.
13. Богомаз А. В. Пакет программ нового поколения для обработки данных радаров некогерентного рассеяния Unified Processing of the Results of Incoherent Scatter Experiments (UPRISE) / А. В. Богомаз, Д. В. Котов // *Вестник Национального технического университета «Харьковский политехнический институт»*. Серия: «Радиофизика и ионосфера». – 2013. – № 28 (1001). – С. 29–37.
14. Богомаз О. В. *Проектування програм обробки даних радара некогерентного розсіяння на мові програмування С. Методичні вказівки до лабораторних робіт з курсу «Цифрова обробка сигналів» для студентів спеціальностей 7.04020402, 8.04020402 «Радіофізика та електроніка» та з курсу «Проектування програм обробки радіофізичних даних» для студентів спеціальностей 7.05010203, 8.05010203 «Спеціалізовані комп'ютерні системи»* / уклад. О. В. Богомаз, Д. В. Котов, С. В. Панасенко. – Харків: НТУ «ХПІ», 2015. – 36 с.
15. Bogomaz O. V. A library of routines for incoherent scatter radar data processing / O. V. Bogomaz, D. V. Kotov // *Bulletin of the National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"*.

- Series: *Radiophysics and Ionosphere*. – 2014. – № 47 (1089). – P. 10–14.
16. <http://planet4589.org/space/log/satcat.txt>
17. <http://celestrak.com/NORAD/archives/request.php>
18. <http://www.stoff.pl/>
19. Чепурный Я. Н. Определение характеристик антенны радара некогерентного рассеяния по отражениям от каталогизированных техногенных космических объектов / Я. Н. Чепурный, Л. Я. Емельянов, Д. А. Искра // *Радиотехника: Всеукр. межвед. науч.-техн. сб.* – 2014. – Вып. 178. – С. 75–79.
20. <https://www.sqlite.org/index.html>
21. Пуляев В. О. *Обчислювальні процедури при аналізі некогерентного розсіяння в іоносферній плазмі*: монографія / В. О. Пуляев, С. В. Рогожкін, О. В. Богомаз. – Х: Видавництво НТУ «ХПІ», 2014. – 264 с.
- 2018r.: u 4 ch. Ch. III. / za red. prof. Sokola Ye.I. – Kharkiv: NTU «KhPI». – S. 304.
9. ftp://ftp.swpc.noaa.gov/pub/indices/old_indices/2017_DGD.txt
10. Bilitza D. International Reference Ionosphere 2016: From ionospheric climate to real-time weather predictions / D. Bilitza, D. Altadill, V. Truhlik, V. Shubin, I. Galkin, B. Reinisch, X. Huang // *Space Weather*, N 15. – P. 418–429. – 2017, doi:10.1002/2016SW001593.
11. Bogomaz O. Advances in software for analysis of Kharkiv incoherent scatter radar data / O. Bogomaz, D. Kotov, S. Panasenko, L. Emelyanov // *2017 IEEE International conference of information-telecommunication technologies and radio electronics (UkrMiCo'2017) / Materials of scientific and technical conference.* – Kyiv: Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, 2017. – P. 531–535.
12. Bogomaz A. V. Jetapy obrabotki danykh radaru nekogerentnogo rassejanija / A. V. Bogomaz // *Konferencija molodyh uchjonyh «Distancionnoe radiozondirovanie ionosfery (ION-2012)» (Har'kov, Ukraina, 18 – 20 aprelja 2012 g.)*. – Sbornik tezisov. – 2012. – S. 7.
13. Bogomaz A. V. Paket program novogo pokolenija dlja obrabotki danykh radarov nekogerentnogo rassejanija Unified Processing of the Results of Incoherent Scatter Experiments (UPRISE) / A. V. Bogomaz, D. V. Kotov // *Vestnik Nacional'nogo tehničeskogo universiteta «Har'kovskij politehničeskij institut». Serija: «Radiofizika i ionosfera»*. – 2013. – № 28 (1001). – S. 29–37.
14. Bohomaz O. V. *Proektuvannia prohram obrabotky danykh radaru nekoherentnogo rozsiiannia C. Metodichni vkazivky do laboratornykh robot z kursu «Tsyfrova obrabotka syhnaliv» dlja studentiv spetsialnosti 7.04020402, 8.04020402 «Radiofizyka ta elektronika» ta z kursu «Proektuvannia prohram obrabotky radiofizyčnykh danykh» dlja studentiv spetsialnosti 7.05010203, 8.05010203 «Spetsializovani komp'uterni systemy»* / uklad. O. V. Bohomaz, D. V. Kotov, S. V. Panasenko. – Kharkiv : NTU «KhPI», 2015. – 36 s.
15. Bogomaz O. V. A library of routines for incoherent scatter radar data processing / O. V. Bogomaz, D. V. Kotov // *Bulletin of the National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»*. Series: *Radiophysics and Ionosphere*. – 2014. – № 47 (1089). – P. 10–14.
16. <http://planet4589.org/space/log/satcat.txt>
17. <http://celestrak.com/NORAD/archives/request.php>
18. <http://www.stoff.pl/>
19. Чепурный Я. Н. Определение характеристик антенны радара некогерентного рассеяния по отражениям от каталогизированных техногенных космических объектов / Я. Н. Чепурный, Л. Я. Емельянов, Д. А. Искра // *Радиотехника: Всеукр. межвед. науч.-техн. сб.* – 2014. – Вып. 178. – С. 75–79.
20. <https://www.sqlite.org/index.html>
21. Пуляев В. О. *Обчислювальні процедури при аналізі некогерентного розсіяння в іоносферній плазмі*: монографія / В. О. Пуляев, Ye. V. Rohozhkin, O. V. Bohomaz. – Kharkiv : Vydavnytstvo NTU «KhPI», 2014. – 264 s.

Поступила (received) 07.12.2018

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Богомаз Олександр Вікторович (Богомаз Александр Викторович, Bogomaz Oleksandr Viktorovych) – кандидат технічних наук, Інститут іоносфери, старший науковий співробітник; м. Харків, України; ORCID: 0000-0001-6824-2346; e-mail: o.v.bogomaz1985@gmail.com

Котов Дмитро Володимирович (Котов Дмитрий Владимирович, Kotov Dmytro Volodymyrovych) – кандидат фізико-математичних наук, доцент, Інститут іоносфери, старший науковий співробітник; м. Харків, України; ORCID: 0000-0003-0506-6466; e-mail: dmitrykotoff@gmail.com

Искра Дмитро Олександрович (Искра Дмитрий Александрович, Iskra Dmytro Oleksandrovych) – Інститут іоносфери, молодший науковий співробітник; м. Харків, України; e-mail: iskradmitry@gmail.com

Л. Я. ЕМЕЛЬЯНОВ, А. Е. МИРОШНИКОВ, В. В. КОЛОДЯЖНЫЙ

РАЗРАБОТКА ПОДСИСТЕМЫ ПРИЕМА СИГНАЛА НЕКОГЕРЕНТНОГО РАССЕЯНИЯ, ЕГО ЗАПИСИ И ОБРАБОТКИ НА ПРОМЕЖУТОЧНОЙ ЧАСТОТЕ

Разработана и внедрена подсистема приема, записи на промежуточной частоте и обработки сигнала, которая реализует предложенный способ корреляционной обработки сигнала некогерентного рассеяния и позволяет избавиться от недостатков, присущих системам с фиксированным алгоритмом обработки. Для дискретизации сигнала используются импульсы опроса с периодом следования, равным четверти периода сигнала синхронного гетеродина, частота которого равна промежуточной частоте приемника с точностью до доплеровского сдвига спектра сигнала рассеяния, вызванного движением ионосферной плазмы. Таким образом, соседние отсчеты сигнала находятся в квадратурной зависимости. Это позволяет определять ординаты квадратурных составляющих корреляционной функции принятого сигнала с временными сдвигами (аргументами), кратными периоду сигнала промежуточной частоты и оптимальными для конкретных условий. Предложено использовать для каждого дискретного аргумента корреляционной функции одну ординату в качестве косинусной и две ординаты, симметрично сдвинутые относительно нее на один период импульсов опроса, в качестве синусных составляющих. Это позволяет исключить смещение в определении скорости движения плазмы и повысить точность определения огибающей корреляционной функции, по которой оцениваются параметры ионосферы. Рассмотрены аппаратно-методические особенности подсистемы и обработки сигнала. Основными элементами подсистемы являются усилитель промежуточной частоты с возможностью бланкирования принимаемого сигнала во время зондирования, быстродействующий аналого-цифровой преобразователь на базе модуля L-card E20-10, персональный компьютер и устройство формирования опросных импульсов аналого-цифрового преобразователя. Предложен оригинальный способ формирования импульсов опроса, основанный на выделении 4-й гармоники сигнала из последовательности импульсов с оптимальной скважностью. Приведена принципиальная схема разработанного устройства формирования опросных импульсов. Представлены экспериментальные результаты, подтверждающие эффективность предложенного способа корреляционной обработки и разработанной подсистемы. Основные преимущества разработки: исключение аналоговых цепей для формирования квадратурных сигналов позволяет избежать возможного влияния ряда аппаратных факторов на точность определения квадратурных составляющих корреляционной функции сигнала; адаптация шага временного сдвига и количества ординат измеряемой корреляционной функции к некогерентно рассеянному сигналу при различном состоянии ионосферы позволяет уменьшить погрешности оценки корреляционной функции полезного сигнала и, следовательно, параметров ионосферы; запись большого количества отсчетов сигнала с малыми интервалами между ними позволяет дополнительно к корреляционному анализу использовать спектральную обработку, а также апробировать и использовать различные алгоритмы обработки, наиболее приемлемые для конкретных условий измерений; появляется возможность исключения помех на ранней стадии обработки, анализируя непосредственно отсчеты сигнала.

Ключевые слова: радар некогерентного рассеяния, некогерентно рассеянный сигнал, система обработки данных, корреляционная обработка, параметры ионосферы.

Л. Я. ЕМЕЛЬЯНОВ, А. Е. МИРОШНИКОВ, В. В. КОЛОДЯЖНЫЙ

РОЗРОБКА ПІДСИСТЕМИ ПРИЙОМУ СИГНАЛУ НЕКОГЕРЕНТНОГО РОЗСІЯННЯ, ЙОГО ЗАПИСУ Й ОБРОБКИ НА ПРОМІЖНІЙ ЧАСТОТІ

Розроблено та впроваджено підсистему прийому, запису на проміжній частоті і обробки сигналу, яка реалізує запропонований спосіб кореляційної обробки сигналу некогерентного розсіяння і дозволяє позбутися недоліків, властивих системам з фіксованим алгоритмом обробки. Для дискретизації сигналу використовуються імпульси опитування з періодом слідування, рівним чверті періоду сигналу синхронного гетеродина, частота якого дорівнює проміжній частоті приймача з точністю до доплерівського зсуву спектру сигналу розсіяння, що викликаний рухом іоносферної плазми. Таким чином, сусідні відліки сигналу знаходяться у квадратурній залежності. Це дозволяє визначати ординати квадратурних складових кореляційної функції прийнятого сигналу з часовими зсувами (аргументами), кратними періоду сигналу проміжної частоти і оптимальними для конкретних умов. Запропоновано використовувати для кожного дискретного аргументу кореляційної функції одну ординату як косинусну і дві ординати, симетрично зсунуті відносно неї на один період імпульсів опитування, як синусних складових. Це дозволяє виключити зміщення у визначенні швидкості руху плазми і підвищити точність визначення обвідної кореляційної функції, за якою оцінюються параметри іоносфери. Розглянуто апаратно-методичні особливості підсистеми та обробки сигналу. Основними елементами підсистеми є підсилювач проміжної частоти з можливістю бланкування сигналу під час зондування, швидкодіючий аналого-цифровий перетворювач на базі модуля L-card E20-10, персональний комп'ютер і пристрій формування опитувальних імпульсів аналого-цифрового перетворювача. Запропоновано оригінальний спосіб формування імпульсів опитування, заснований на виділенні 4-й гармоніки сигналу з послідовності імпульсів з оптимальною скважністю. Наведено принципову схему розробленого пристрою формування опитувальних імпульсів. Представлені експериментальні результати підтверджують ефективність запропонованого способу кореляційної обробки і розробленої підсистеми. Основні переваги розробки є такі: виключення аналогових ланцюгів для формування квадратурних сигналів дозволяє уникнути можливого впливу ряду апаратних факторів на точність визначення квадратурних складових кореляційної функції сигналу; адаптація кроку часового зсуву і кількості ординат вимірюваної кореляційної функції до сигналу некогерентного розсіяння при різному стані іоносфери дозволяє зменшити похибки оцінки кореляційної функції корисного сигналу і, отже, параметрів іоносфери; запис великої кількості відліків сигналу з малими інтервалами між ними дозволяє додатково до кореляційного аналізу використовувати спектральну обробку, а також апробувати і використовувати різні алгоритми обробки, що найбільш прийнятні для конкретних умов вимірювань; з'являється можливість виключення перешкод на ранній стадії обробки, аналізуючи безпосередньо відліки сигналу.

Ключові слова: радар некогерентного розсіяння, некогерентно розсіяний сигнал, система обробки даних, кореляційна обробка, параметри іоносфери.

DEVELOPMENT OF SUBSYSTEM FOR RECEPTION OF INCOHERENT SCATTER SIGNAL, ITS RECORDING AND PROCESSING AT THE INTERMEDIATE FREQUENCY

The subsystem of signal reception, recording at intermediate frequency and processing, which implements the proposed method of the incoherent scatter signal correlation processing and eliminates the shortcomings of systems with a fixed processing algorithm, has been developed and implemented. For sampling the signal, reading pulses are used with a repetition period equal to a quarter of the period of the synchronous heterodyne signal, whose frequency is equal to the intermediate frequency of the receiver up to the Doppler shift of the spectrum of the scattered signal caused by the movement of the ionospheric plasma. Thus, the adjacent signal samples are in quadrature dependence. This allows us to determine the ordinates of the quadrature components of the correlation function of a received signal with time shifts (arguments), multiple to the period of the intermediate frequency signal and optimal for specific conditions. For each discrete argument of the correlation function, we proposed to use one ordinate as a cosine and two ordinates, symmetrically shifted relative to it by one period of the reading pulses, as sine components. This allows us to eliminate the bias in estimating the plasma velocity and improve the accuracy of determining the correlation function envelope that is used to estimate the parameters of the ionosphere. The hardware and methodical features of the subsystem and signal processing are considered. The main elements of the subsystem are the intermediate frequency amplifier with the possibility of blanking the received signal during sounding, a high-speed analog-to-digital converter based on the L-card E20-10 module, a personal computer, and unit for shaping analog-to-digital converter reading pulses. An original method for generating reading pulses based on extracting the 4th harmonic of a signal from a sequence of pulses with an optimal relative pulse duration is proposed. A schematic diagram of the developed unit for shaping reading pulses is given. Experimental results confirming the effectiveness of the proposed correlation processing method and developed subsystem are presented. The main advantages of the development: exclusion of analog circuits for shaping quadrature signals allows us to avoid the possible influence of a number of instrumental factors on the accuracy in determination of the quadrature components of the signal correlation function; adapting the time shift step and the number of ordinates of the measured correlation function to the incoherently scattered signal at different states of the ionosphere reduces errors of estimation of the useful signal correlation functions and, therefore, the parameters of the ionosphere; recording a large number of signal samples with small intervals between them make it possible, in addition to correlation analysis, to use spectral processing, as well as test and use various processing algorithms that are most appropriate for specific measurement conditions; it is possible to eliminate interference at early stage of processing by analyzing the signal samples directly.

Keywords: incoherent scatter radar, incoherent scatter signal, data processing system, correlation processing, ionospheric parameters.

Введение. Для определения параметров ионосферы методом некогерентного рассеяния (НР) используются антенны с большими габаритами, мощные радиопередающие и чувствительные радиоприемные устройства [1, 2]. Дальнейшее улучшение параметров этих систем затруднительно и экономически не всегда обосновано. Развитие компьютерной техники позволяет в настоящее время применять высокопроизводительные компьютеры с большим объемом памяти и, как следствие, значительно расширить возможности радара НР и повысить точность измеряемых параметров ионосферы путем использования эффективных алгоритмов обработки НР сигнала.

Обработка НР сигнала на промежуточной частоте (ПЧ) позволяет использовать алгоритмы, адаптируемые к исследуемому диапазону высот и состоянию ионосферы, а также выполнять как корреляционную, так и спектральную обработку НР сигнала, выявляя и оценивая асимметрию его спектра (в частности, при возмущениях в ионосфере), а также повысить точность измерения параметров НР сигнала (и, соответственно, ионосферы), исключая влияние ряда аппаратных факторов и увеличивая количество дискретных отсчетов обрабатываемого сигнала при его цифровой обработке [3].

Запись дискретных отсчетов сигнала осуществляется с помощью АЦП по приходу импульсов опроса. Для цифровой обработки сигнала, выделенного радиоприемным устройством на ПЧ, импульсы опроса должны быть жестко привязаны к ПЧ. Также должна быть обеспечена возможность получения квадратурных составляющих корреляционной функции НР сигнала в процессе его цифровой обработки. В связи с этим возникла необходимость в разработке и внедрении устройства

формирования таких импульсов, а также усилительного тракта ПЧ, позволяющего осуществлять частотную фильтрацию сигнала и усиливать его до уровня, достаточного для АЦП.

Целью данной работы является разработка подсистемы, которая позволяет обрабатывать сигналы с использованием записей оцифрованных значений сигнала на промежуточной частоте, и алгоритмов обработки, адаптированных к параметрам НР сигнала, зависящих от состояния ионосферы.

Аппаратурно-методическая реализация измерения параметров НР сигнала на промежуточной частоте. Для получения качественных данных о параметрах ионосферы с помощью радара НР Института ионосферы используется высокочувствительный радиоприемник с тройным преобразованием частоты и выполняется корреляционная обработка сигналов, выделяемых квадратурными каналами радиоприемника с помощью синхронного детектирования и фильтрации сигнала [2].

Структурная схема существующей системы приема и обработки сигнала НР на видеочастоте представлена на рис. 1. В тракте ВЧ осуществляется бланкирование просачивающегося от антенно-фидерного устройства (АФУ) импульса радиопередатчика с целью его подавления во время зондирования. В тракте ПЧ спектр НР сигнала переносится с несущей частоты $f_0 = 158$ МГц на ПЧ $f_{np} = 972,4$ кГц. Каждый из двух квадратурных каналов содержит синхронный детектор с ФНЧ и усилителем и АЦП. Сигналы гетеродинов с частотами f_{r1} , f_{r2} и f_{cr} формируются таким образом, что центральная частота спектра НР сигнала на выходе тракта ПЧ в отсутствие доплеровского сдвига, вызванного движением ионосферной плазмы, (f_{np}) равна частоте синхронного гетеродина f_{cr} . Для формирования квадратурных

сигналов используются сигналы синхронного гетеродина с разностью фаз $\varphi=90^\circ$.

К данной системе предъявляются жесткие требования по обеспечению идентичности параметров

квадратурных каналов, точности и стабильности формирования квадратурных сигналов для измерения скорости движения ионосферной плазмы.

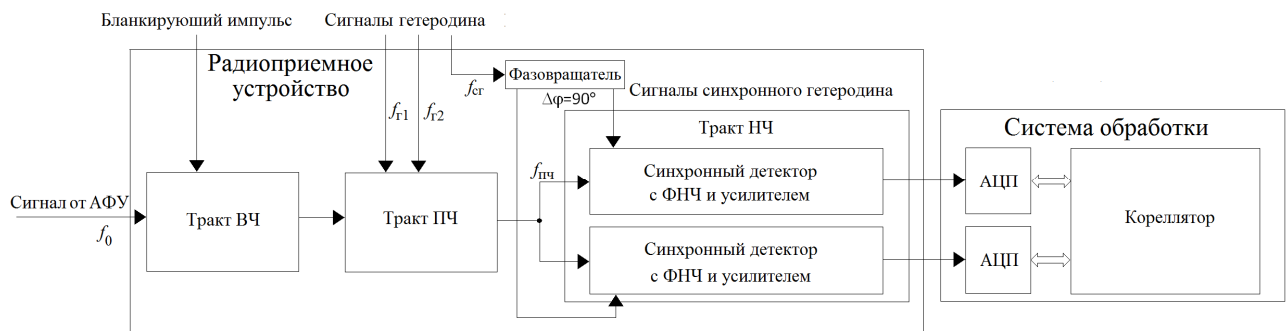


Рис. 1. Структурная схема системы приема и обработки сигнала на видеочастоте

Был предложен новый способ построения приемно-регистрающей системы, которая предусматривает обработку принятого сигнала непосредственно на промежуточной частоте радиоприемного устройства [3, 4]. При этом квадратурные компоненты корреляционной функции (КФ) принятого сигнала определяются исключительно программным способом, что позволяет избежать ошибок, вызванных возможной неидентичностью двух каналов аналогового тракта приемника и двух АЦП системы обработки сигналов. Также исключается необходимость контроля и поддержания разности фаз 90° сигналов синхронного гетеродина, формируемых с помощью аналогового фазовращателя.

Кроме этого, появляется возможность значительно увеличить частоту записи дискретных отсчетов обрабатываемого сигнала для повышения точности измерения параметров НР сигнала. Современные высокопроизводительные ПК позволяют записывать и хранить большой массив отсчетов сигнала на промежуточной частоте, а также использовать цифровую обработку с оптимизированными алгоритмами (специфичными для разных диапазонов высоты и состояния ионосферы [5]).

На рис. 2 представлена структурная схема новой подсистемы приема и обработки сигнала на ПЧ,

которая использует только один быстродействующий АЦП на базе модуля L-card E20-10 (<http://www.lcard.ru/docs/e20-10>).

Подсистема дополняет действующую радиоприемную систему. Она включает в себя блок усиления и фильтрации сигнала ПЧ (состоящий из двух усилителей и полосового фильтра), АЦП, персональный компьютер (ПК) и устройство формирования опросных импульсов. Для жесткой привязки импульсов опроса АЦП к ПЧ в качестве входного сигнала для устройства формирования опросных импульсов используется сигнал синхронного гетеродина с частотой $f_{сг} = f_{пр} = 972,4$ кГц (при этом обеспечивается когерентная работа гетеродинов радиоприемника и сигнала задающей системы для радиопередатчика). На выходе устройства формируются импульсы с частотой следования, равной $4 \cdot f_{сг}$, т.е. с периодом следования, равным четверти периода сигнала синхронного гетеродина. Таким образом, соседние отсчеты сигнала находятся в квадратурной зависимости. Это позволяет определять ординаты квадратурных составляющих КФ $R(\tau)$ с временными сдвигами (аргументами) τ , кратными периоду ПЧ и оптимальными для конкретных условий.

В качестве сигнала обозначения начала каждой радиолокационной развертки используются импульсы запуска передатчика радара НР.

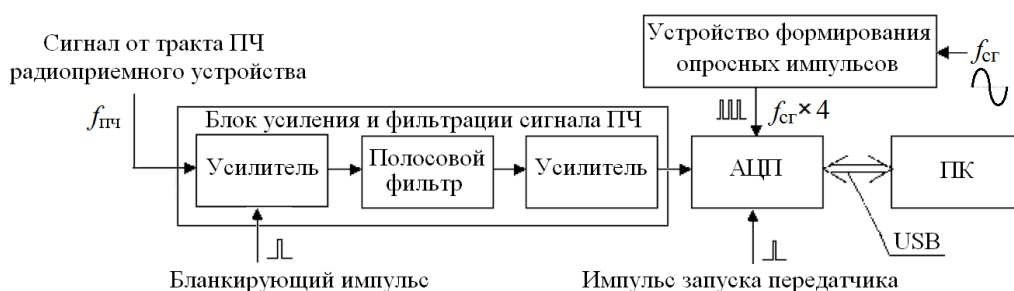


Рис. 2. Структурная схема подсистемы приема и обработки сигнала на промежуточной частоте

Блок усиления и фильтрации сигнала ПЧ. В разработанном и изготовленном нами блоке осуществляется усиление сигнала приемника до уровня, необходимого для нормальной работы АЦП, и его фильтрация. Ширина полосы пропускания тракта ПЧ подсистемы по уровню 0,7 составляет 38 кГц. Ширина пологого участка амплитудно-частотной характеристики равна 18 кГц при ее неравномерности 0,086 дБ. Эти характеристики определяются полосовым фильтром, выполненным на трех связанных LC контурах, и приемлемы для фильтрации без искажения сигнала НР с наиболее широким ожидаемым спектром, характерным для сигнала, рассеянного на высотах внешней ионосферы при наличии в ней легких ионов. Для обеспечения отношения сигнал/шум, близкого к максимально возможному для конкретных высот ионосферы и ее состояния, предназначена дополнительная цифровая квазиоптимальная фильтрация в процессе обработки сигнала в ПК. В первом усилителе предусмотрено бланкирование для дополнительного подавления сигнала передатчика во время зондирования. Второй усилитель, помимо основной функции усиления, осуществляет сопряжение фильтра с входом АЦП. Оба усилителя выполнены на МОП-транзисторах КП307Ж. В качестве бланкирующего элемента в первом усилителе используются ключи на МОП-транзисторах в составе микросхемы К547КП1Б. На выходе второго усилителя используется операционный усилитель на базе микросхемы AD826.

Устройство формирования опросных импульсов АЦП. К формирователю опросных импульсов АЦП предъявляются особые требования к стабильности (температурной и временной) и точности умножения частоты. Это вызвано прецизионностью выборки сигнала для обеспечения квадратурности его отсчетов, используемых для дальнейшего расчета параметров НР сигнала и ионосферы. Для формирования импульсного сигнала с учетверенной ПЧ были проанализированы несколько вариантов умножителей частоты. В частности, были рассмотрены вариант на двух удвоителях частоты и вариант на каскаде с отсечкой тока и выделением 4-й гармоники. Наиболее приемлемым оказался предложенный нами вариант, основанный на выделении 4-й гармоники из последовательности импульсов с оптимальным соотношением периода следования и длительности. Это видно из следующих соображений.

Вариант умножителя частоты с использованием сигнала с отсечкой. Если входной сигнал $u(t) = U_m \cos 2\pi f_{cr} t$ ограничить по уровню $U_{огр}$, амплитуда n -ой гармоники, как известно, равна

$$a_n = U_m \gamma_n(\theta).$$

Здесь U_m – амплитуда входного сигнала, $\gamma_n(\theta)$ – коэффициент Берга для n -ой гармоники:

$$\gamma_1 = \frac{1}{\pi} (\theta - \sin \theta \cos \theta),$$

$$\gamma_n(\theta) = \frac{2 \sin n \theta \cos \theta - n \cos n \theta \sin \theta}{\pi (n^2 - 1)},$$

где θ – угол отсечки, $\theta = \arccos(U_{огр}/U_m)$.

Оптимальным для выделения полезной 4-ой гармоники является угол отсечки $\theta = \pi/2$, но при этом велика составляющая мешающей 2-ой гармоники, для которой это значение θ также оптимально.

Вариант умножителя частоты с импульсным сигналом. Мы предложили вариант умножения частоты, основанный на преобразовании входного гармонического сигнала в серию импульсов с таким же периодом следования $T_{cr} = 1/f_{cr}$ и длительностью τ_n с последующей фильтрацией. При разложении в ряд Фурье такого импульсного сигнала амплитуда n -й гармоники равна

$$a_n = \frac{2A}{\pi n} \sin \left(n\pi \frac{\tau_n}{T_{cr}} \right),$$

где A – амплитуда импульсов. Приравняв $da_n/d\tau_n$ нулю, получим оптимальные значения $\tau/T_{cr} = 1/(2n)$ или $3/(2n)$ для n -й гармоники. Расчеты показали, что для выделения 4-й гармоники, и максимального подавления ближайшей 3-й гармоники наиболее приемлемым является соотношение $\tau/T_{sg} = 0,333$, близкое к $3/(2 \cdot 4)$.

Таблица 1, в которой представлены вычисленные с использованием выше приведенных выражений отношения амплитуд мешающих гармоник к амплитуде 4-й гармоники (a_n/a_4 , до операции фильтрации сигнала), иллюстрирует преимущество предложенного способа.

Таблица 1 – Отношение амплитуд гармоник к амплитуде 4-ой гармоники

n	Вариант с отсечкой сигнала	Вариант с импульсным сигналом	
	$\theta = \pi/2$	$\tau/T_{cr} = 0,125$ или $0,375$	$\tau/T_{cr} = 0,333$
1	11,8	1,5	4,0
2	5,0	1,4	2,0
3	$1,8 \cdot 10^{-5}$	1,2	$1,2 \cdot 10^{-5}$

Перед разработкой устройства вариант с импульсным сигналом был апробирован путем моделирования с помощью программы *Multisim*.

На рис. 3 представлена структурная схема разработанного устройства. Эпюры сигналов поясняют его работу.

Буферные усилители, выполненные на полевых транзисторах, обеспечивают развязку радиотехнических цепей. Преобразование сигналов синусоидальной формы в прямоугольную осуществляется с помощью компараторов,

выполненных на базе быстродействующих микросхем Analog Device AD8561.

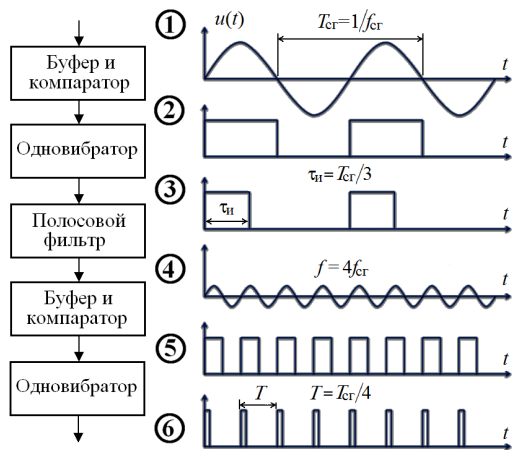


Рис. 3. Структурная схема устройства формирования опросных импульсов АЦП и временные диаграммы напряжений сигналов в его цепях

Для устранения возможных ложных срабатываний компаратора от помехи применена конфигурация схемы с гистерезисом. Первый одновибратор предназначен для формирования импульсов с оптимальной (для выделения полосовым фильтром 4-й гармоники сигнала синхронного гетеродина) длительностью, которая равна 1/3 или 2/3 от периода входного сигнала. Полосовой фильтр, состоящий из двух связанных контуров, подавляет остальные гармоники сигнала, а второй компаратор и одновибратор формируют необходимую форму для опросных импульсов. Оба одновибратора выполнены на микросхеме Philips 74HC4538. Запись информации в АЦП осуществляется по переднему фронту сформированных импульсов опроса. Разрешение на запись дискретных отсчетов сигнала осуществляется под управлением системы синхронизации радара.

На рис. 4 представлена принципиальная схема разработанного и изготовленного устройства формирования опросных импульсов АЦП.

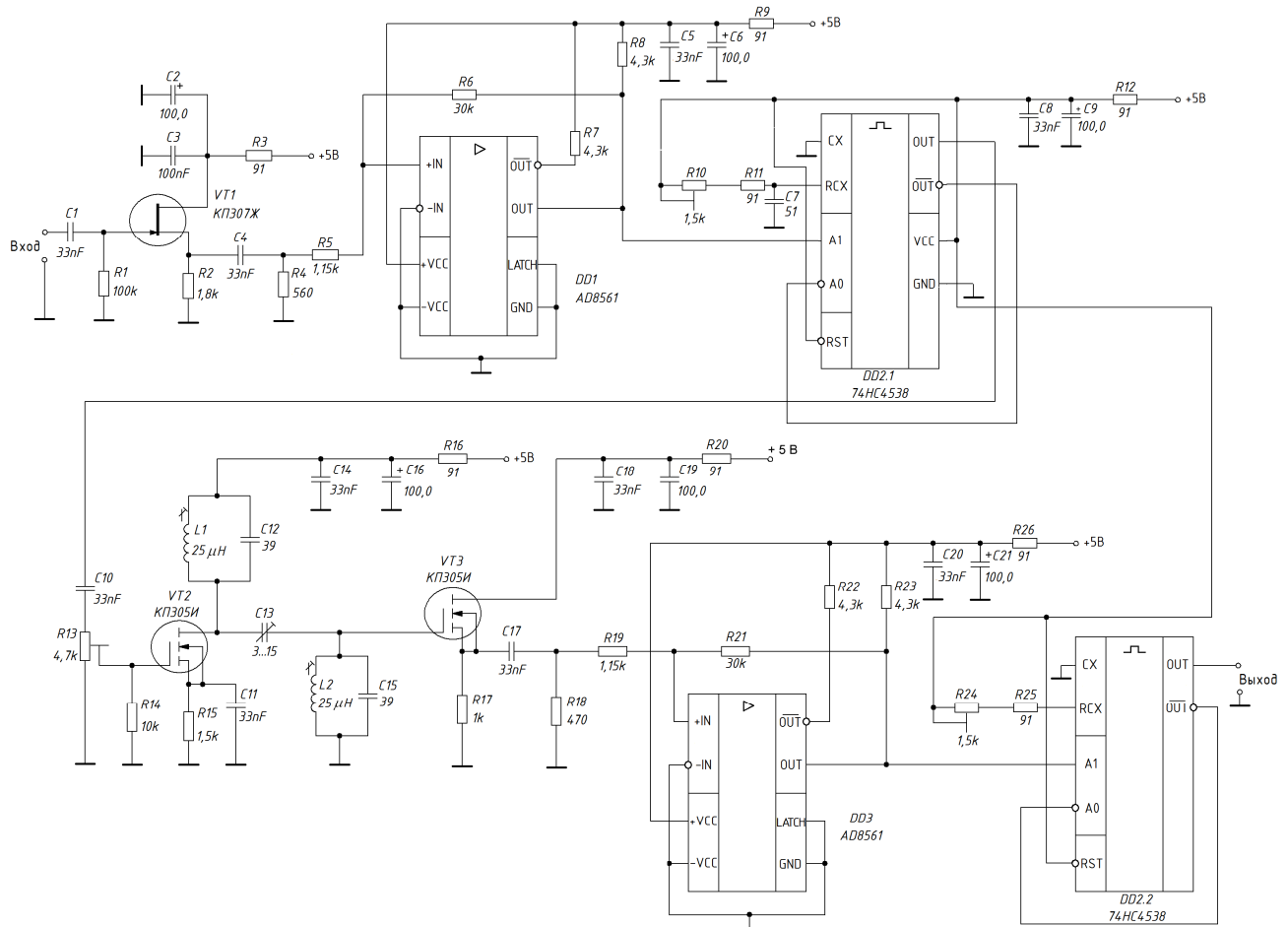


Рис. 4. Принципиальная схема устройства формирования опросных импульсов

Входным сигналом служит гармонический сигнал синхронного гетеродина с напряжением 0,7 В. Изменение напряжения входного сигнала в широких пределах не влияет на работу формирователя

опросных импульсов. На выходе устройства вырабатывается серия импульсов с уровнем ТТЛ логики. С помощью подстроечных резисторов R10 и R24 устанавливается оптимальная длительность

импульсов на выходе первого одновибратора и требуемая скважность сигнала на выходе устройства соответственно.

Осциллограммы сигналов на входе и выходе устройства приведены на рис. 5.

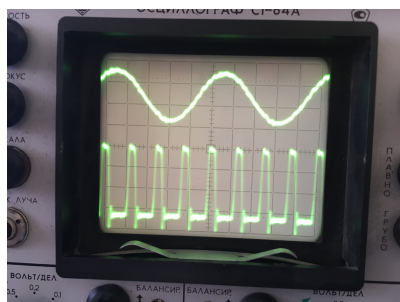
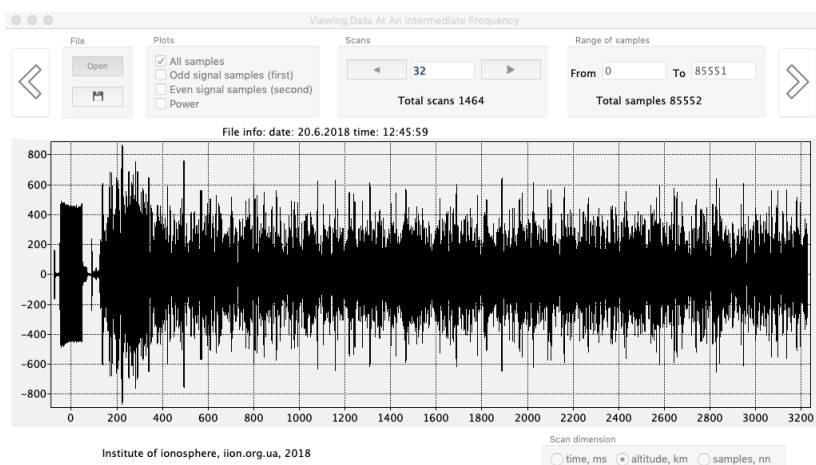


Рис. 5. Входной и выходной сигналы устройства формирования опросных импульсов АЦП на экране осциллографа

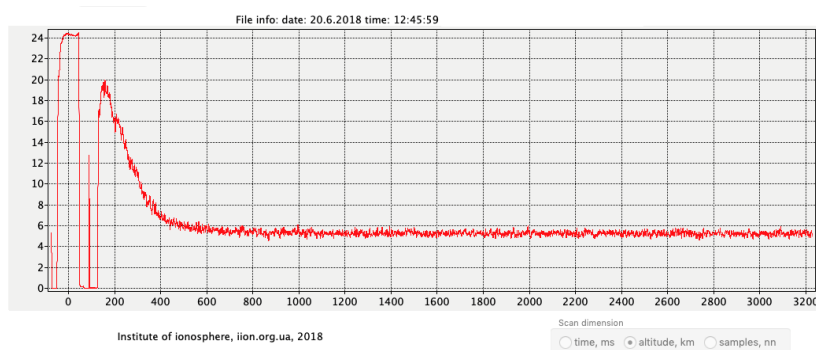
Обработка сигнала на промежуточной частоте. Во время измерения ионосферных параметров осуществляется запись оцифрованных мгновенных значений (дискретных отсчетов)

выходного сигнала приемника и их хранение в двоичных файлах, каждый из которых соответствует, как правило, одноминутному сеансу измерений. В этих файлах содержится также служебная информация [6].

На рис. 6, а приведен пример одной из полученных экспериментально радиолокационных разверток, где показаны измеренные дискретные отсчеты сигнала ПЧ на выходе радиоприемного устройства (в течение каждого сеанса измерений длительностью 1 мин имеется 1464 разверток, а каждая из разверток содержит 85552 отсчета). По оси абсцисс представлены значения высоты в километрах, а по оси ординат – значения напряжения сигнала в условных единицах. Отсчет высоты начинается с середины зондирующего импульса (см. в левой части рисунка, где виден просачивающийся через антенный коммутатор фидерного тракта и бланкирующие элементы приемника импульс передатчика). На участках развертки слева виден НР сигнал на фоне космического и аппаратурного шума.



а



б

Рис. 6. Экспериментальные данные, полученные во время измерения ионосферных параметров: преобразованный в цифровой вид и записанный сигнал ПЧ на выходе радиоприемного устройства на протяжении одной радиолокационной развертки (а) и высотный профиль мощности этого сигнала, накопленный в течение сеанса измерений длительностью 1 мин (б)

На рис. 6, б представлена высотная зависимость мощности сигнала (в условных единицах) на выходе радиоприемного устройства, накопленная в течение сеанса измерений в составе радара НР параметров ионосферы.

Обработка принятого сигнала на ПЧ включает в себя такие же стадии, что и обработка сигнала на низкой частоте, описанная в [7, 8]: оценка ординат КФ, просмотр данных и удаление помех, усреднение по времени (обычно 15 мин), исключение шума, учет характеристики восстановления антенного коммутатора, оценка параметров ионосферной плазмы.

Особенности предложенного нами способа корреляционной обработки на ПЧ легко представить с помощью рис. 7, где иллюстрируются КФ НР сигнала на ПЧ при отсутствии доплеровского сдвига спектра (сплошные линии) и при его наличии (пунктир), вызванном общим движением плазмы вдоль луча радара. Точками показаны ординаты КФ, участвующие в корреляционной обработке. $R_o(\tau)$ – огибающая КФ.

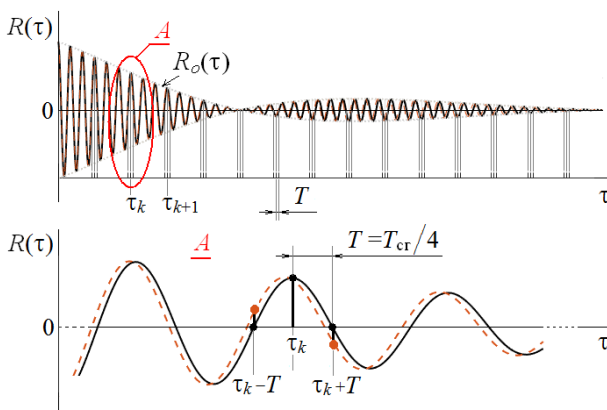


Рис. 7. Корреляционные функции НР сигнала на промежуточной частоте в отсутствие доплеровского сдвига спектра (сплошные линии) и при его наличии (пунктирные линии), вызванном движением плазмы вдоль луча радара

При соблюдении соотношения $T=T_{cr}/4$, ординаты синусной составляющей КФ, соответствующие ординатам измеренной КФ с фиксированным временным сдвигом ($\tau_k - T$) или ($\tau_k + T$), равны нулю в случае отсутствия движения плазмы (доплеровский сдвиг спектра НР сигнала $f_d = 0$) и отличаются от нуля при $f_d \neq 0$, а косинусная составляющая $R(\tau) = R(\tau_k)$ равна огибающей КФ $R_o(\tau_k)$ в первом и близка к ней во втором случае. Использование двух ординат синусной составляющей для каждого k -го аргумента КФ позволяет исключить смещение в определении скорости движения ионосферной плазмы.

Корреляционная обработка сигнала на ПЧ включает в себя следующее.

Оцениваются ординаты косинусной и синусной составляющих КФ принятого сигнала для каждой дискретной радиолокационной задержки t_j , соответствующей высоте $h_j = ct_j/2$ центра

рассеивающего участка ионосферной плазмы протяженностью $\Delta h_j = c\tau_{3и}/2$, для фиксированных временных сдвигов (аргументов КФ) τ_k .

$$R_{\cos(c+\text{ш})}(h_j, \tau_k) = \overline{u(t_j) u(t_j + \tau_k)},$$

$$R_{\sin(c+\text{ш})}(h_j, \tau_k + T) = \overline{u(t_j) u(t_j + \tau_k + T)},$$

$$R_{\sin(c+\text{ш})}(h_j, \tau_k - T) = \overline{u(t_j) u(t_j + \tau_k - T)},$$

где $u(t_j)$ – мгновенные значения сигнала в моменты времени t_j , c – скорость света, $\tau_k = k\Delta\tau$, k – номер ординаты КФ, $k=0, 1, \dots, n$, n – количество используемых для расчета ионосферных параметров ординат КФ, $\Delta\tau$ – шаг сдвига (аргумента КФ), $T = T_{cr}/4$, $\tau_{3и}$ – длительность зондирующего импульса.

КФ НР сигнала определяются в виде разности КФ смеси сигнал+шум на каждом конкретном участке радиолокационной развертки и КФ шума, усредненной на участках развертки, где НР сигнал отсутствует:

$$R_{\cos}(h_j, \tau_k) = R_{\cos(c+\text{ш})}(h_j, \tau_k) - \overline{R_{\cos(\text{ш})}(\tau_k)},$$

$$R_{\sin}(h_j, \tau_k \pm T) = R_{\sin(c+\text{ш})}(h_j, \tau_k \pm T) - \overline{R_{\sin(\text{ш})}(\tau_k \pm T)},$$

$$R_{\sin}(h_j, \tau_k) = \frac{1}{2} [R_{\sin}(h_j, \tau_k - T) - R_{\sin}(h_j, \tau_k + T)].$$

Ординаты огибающей КФ определяются как

$$R_o(h_j, \tau_k) = \sqrt{R_{\cos}^2(h_j, \tau_k) + R_{\sin}^2(h_j, \tau_k)}.$$

Нормированные КФ

$$r_o(h_j, \tau_k) = R_o(h_j, \tau_k) / R_o(h_j, 0)$$

используются для расчета (с использованием метода наименьших квадратов) высотных профилей ионосферных параметров, таких как температуры ионов и электронов, ионный состав, а также нормированного профиля концентрации электронов. Высотный профиль концентрации электронов рассчитывается с привлечением критической частоты слоя ионосферы F2, которая измеряется ионозондом.

Скорость движения ионосферной плазмы определяется в соответствии с выражением

$$V_z(h_j) = -\frac{\lambda}{4\pi n} \sum_{k=1}^n \frac{1}{\tau_k} \left[\arctg \frac{R_{\sin}(h_j, \tau_k)}{R_{\cos}(h_j, \tau_k)} \right].$$

Новое программное обеспечение позволяет оперативно устанавливать шаг сдвига $\Delta\tau$ и количество используемых для дальнейшей обработки ординат КФ. С уменьшением $\Delta\tau$ повышается точность определения параметров ионосферы. В принципе, минимальный сдвиг $\Delta\tau$ может быть равным периоду T следования импульсов опроса АЦП или периоду T_{cr}

колебаний сигнала синхронного гетеродина (периоду ПЧ). Однако с практической точки зрения (объем накапливаемой информации и возможность обработки в реальном времени в процессе измерений) такой необходимости нет. Как показывают расчеты, при использовании зондирующего радиоимпульсного сигнала с несущей частотой $f_0=158$ МГц и длительностью $\tau_{\text{зи}}=650$ мкс наиболее приемлемые значения $\Delta\tau$ для снижения статистической и систематической погрешности определения ионосферных параметров находятся в пределах $4T_{\text{cr}} < \Delta\tau < 36T_{\text{cr}}$. Причем, выбор $\Delta\tau$ зависит от параметров ионосферы (температур ионов и электронов, ионного состава) для разных высот и ее состояния (см., например, рис. 8).

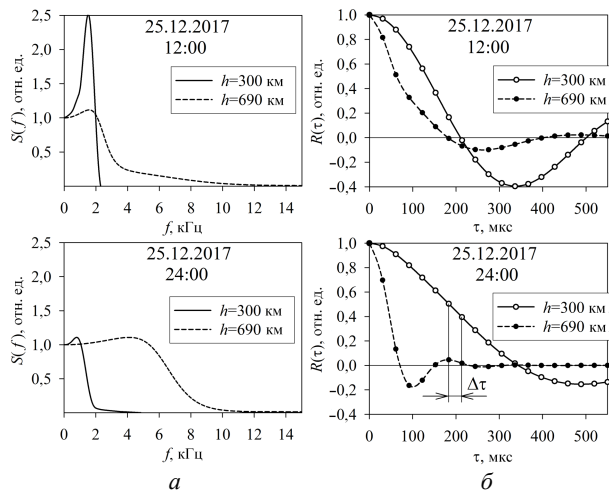


Рис. 8. Пример полуспектров (а) и соответствующих им корреляционных функций (б) НР сигнала для высот вблизи максимума ионизации (сплошная линия) и внешней ионосферы (пунктир), измеренных днем (верхняя панель) и ночью (нижняя панель) с помощью радара НР Института ионосферы в условиях низкой активности Солнца, характеризующихся наибольшими изменениями ионосферных параметров по высоте

Таким образом, если использовать 18–20 ординат КФ на интервале корреляции (второй ноль КФ), что достаточно для определения параметров ионосферы, оптимальным является шаг от $\Delta\tau=5-10$ мкс для высот внешней ионосферы, где преобладают ионы водорода, и $\Delta\tau=30-40$ мкс для высот вблизи максимума ионизации, где в основном присутствуют ионы O^+ .

Экспериментальные результаты при обработке сигнала на промежуточной частоте. После разработки, изготовления и настройки подсистема приема, записи и обработки сигнала на ПЧ была внедрена в состав радиоприемного устройства радара НР, проведены эксперименты. На рис. 9–11 представлены данные измерений, полученные 20 июня 2018 г. при 15-минутном накоплении (12:30–12:45 местного времени).

Измеренная нормированная КФ НР сигнала, рассеянного на высоте 280 км, приведена на рис. 9.

В расчете данной КФ использованы все отсчеты сигнала и минимально возможный шаг сдвига (аргумента) КФ $\Delta\tau=T=T_{\text{cr}}/4=0,257$ мкс. При этом рассчитанная величина вертикальной составляющей скорости движения плазмы $V_z=-62$ м/с.

На рис. 10 представлены измеренные квадратурные составляющие КФ НР сигнала, для трех высот ионосферы. Из рисунка видно, что интервал корреляции уменьшается с увеличением высоты. Для низких и средних высот количество ординат КФ достаточно для дальнейших вычислений, и выбор такого шага $\Delta\tau$ оправдан. Для верхней ионосферы число ординат КФ может быть недостаточным для определения параметров ионосферы с приемлемой точностью (особенно для ночного времени, когда интервал корреляции может быть чрезвычайно коротким).

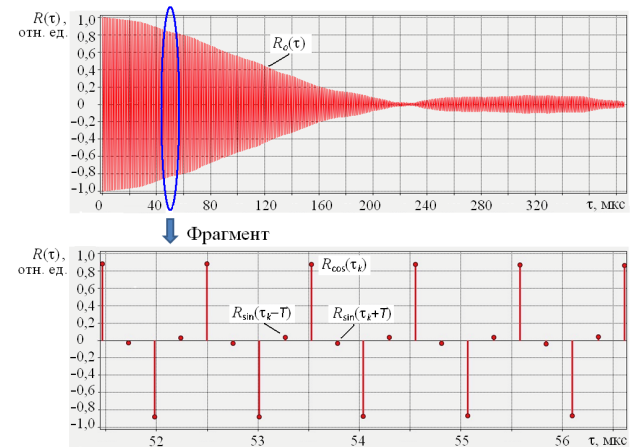


Рис. 9. КФ НР сигнала с высоты 280 км (шаг $\Delta\tau=T=T_{\text{cr}}/4=0,257$ мкс)

Отношение мощности рассеянного на больших высотах сигнала к мощности шума (q) с увеличением высоты уменьшается, и вызванный этим рост статистической погрешности может быть в какой-то степени компенсирован уменьшением шага $\Delta\tau$ и, следовательно, увеличением количеством ординат КФ, имеющих физический смысл и участвующих в обработке.

Для иллюстрации выше сказанного на рис. 11 приведено сравнение результатов корреляционной обработки с использованием адаптивного режима более короткого шага сдвига КФ (в данном случае $\Delta\tau=40 \cdot T_1=10,284$ мкс) и режима со стандартным (до настоящего времени) шагом $\Delta\tau=T_2 \approx 30$ мкс. T_1 и T_2 – интервалы дискретизации сигнала.

Из рис. 11 видно, что при использовании адаптивного режима ($\Delta\tau \approx 10,3$ мкс) КФ сигнала, рассеянного в верхней ионосфере, можно определять более точно даже для дневного времени.

Еще одним преимуществом является то, что бесполезные для обработки ординаты в хвосте КФ (в данном случае показанные на затемненном участке рис. 1, а для $\tau > 300$ мкс), не используются в

дальнейших расчетах параметров ионосферы, тем самым не вносятся дополнительная погрешность, вызванная статистическим разбросом значений этих ординат, экономится память ПК и сокращается время обработки.

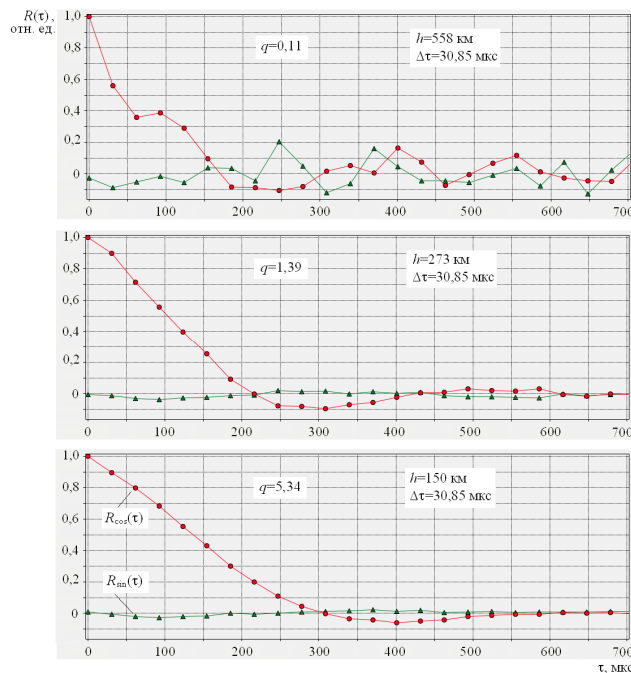


Рис. 10. Оценки косинусных и синусных составляющих корреляционной функции НР сигнала для трех высот: 150, 273 и 558 км (шаг $\Delta\tau=120\cdot T \approx 30,85$ мкс, q – отношение сигнал/шум).

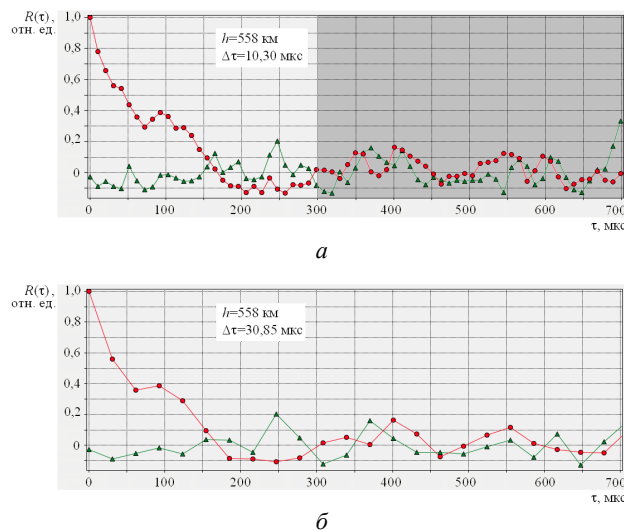


Рис. 11. Сравнение результатов корреляционной обработки с использованием адаптивного (а) и действующего (б) режимов

Расчеты показали, что среднеквадратическое отклонение КФ при сравнении ее с модельной КФ уменьшилось приблизительно в 2 раза при использовании шага $\Delta\tau=40\cdot T \approx 10,3$ мкс вместо

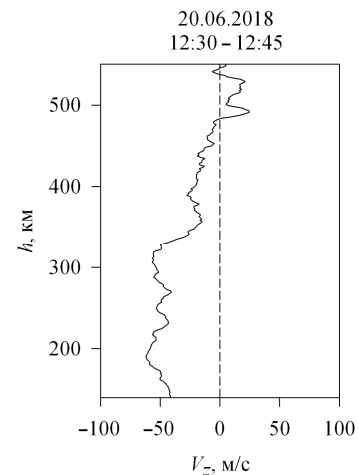


Рис. 12. Высотный профиль вертикальной составляющей скорости движения ионосферной плазмы

$\Delta\tau = 80\cdot T \approx 20,6$ мкс и в 2,5 раза – вместо $\Delta\tau = 120\cdot T \approx 30,9$ мкс.

На рис. 12 в качестве примера показан один из высотных профилей вертикальной составляющей скорости движения ионосферной плазмы, полученный с помощью корреляционной обработки сигнала на ПЧ при временном накоплении 15 мин.

Выводы. Разработана и внедрена подсистема приема, записи на промежуточной частоте и обработки сигнала, которая реализует предложенный способ корреляционной обработки НР сигнала и позволяет избежать от недостатков, присущих системам с фиксированным алгоритмом обработки. Новый способ и реализующая его подсистема дают следующие преимущества:

- Исключение аналоговых цепей для формирования квадратурных сигналов позволяет избежать возможного влияния ряда аппаратных факторов на точность определения квадратурных составляющих корреляционной функции НР сигнала.
- Адаптация шага временного сдвига и количества ординат измеряемой корреляционной функции к НР сигналу при различном состоянии ионосферы, в том числе к НР сигналу, принимаемому с различных высотных участков.
- Возможность увеличения количества отсчетов сигнала на радиолокационной развертке дальности с целью уменьшения статистической погрешности оценки корреляционной функции НР сигнала и, следовательно, параметров ионосферы.
- Возможность использования дополнительно к корреляционному анализу спектральной обработки НР сигнала для детального анализа эффектов в ионосфере, особенно в ее возмущенном состоянии.
- Запись большого количества отсчетов сигнала с малыми (около 0,26 мкс) интервалами между ними позволяет апробировать и использовать в любое время самые различные алгоритмы обработки, наиболее приемлемые для конкретных условий измерений.

• Обработка сигнала на промежуточной частоте приемника дает возможность осуществлять эффективный контроль зондирующих импульсов (распределение амплитуд и фаз на их протяжении) во время проведения измерений, а также учет их характеристик при определении параметров ионосферы.

• Появляется возможность исключения помех на ранней стадии обработки, анализируя непосредственно отсчеты сигнала для каждой радиолокационной развертки, а не вычисленные статистические параметры сигнала при накоплении по всем разверткам в течение сеанса измерений.

Список литературы

1. Evans J. V. Theory and practice of ionosphere study by Thomson scatter radar / J. V. Evans // Proceedings of the IEEE. – V. 57, N 4. – 1969. – P. 496–530. DOI: 10.1109/PROC.1969.7005.
2. Domnin, I. F. Kharkiv Incoherent Scatter Facility / I. F. Domnin, Ya. M. Cherpurnyy, L. Ya. Emelyanov [et al.] // Bulletin of the National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”. Scientific papers. Issue: Radiophysics and ionosphere. – Kharkiv: NTU “KhPI”. – 2014. – N 47 (1089). – P. 28–42.
3. Емельянов Л. Я. Особенности обработки сигналов некогерентного рассеяния на радаре Института ионосферы / Л. Я. Емельянов, А. И. Лялюк, Е. В. Рогожкин // Радиотехника: Всеукр. Межвед. Науч.-техн. сб. – 2015. – Вып. 182. – С. 29–33.
4. Emelyanov L. Features of signals reception and processing at the Kharkiv Incoherent Scatter Radar / L. Emelyanov, A. Miroshnikov, I. Domnin, E. Rogozhkin // 2018 International Conference on Information and Telecommunication Technologies and Radio Electronics (UkrMiCo) 10–14 Sept. 2018, Odesa, Ukraine, IEEE Conference Publications, – 2018.
5. Емельянов Л. Я. Квазиоптимальный прием сигналов некогерентного рассеяния / Л. Я. Емельянов, А. В. Богомаз, И. М. Касымов // Вісн. Нац. техн. ун-ту «Харківський політехнічний інститут». Збірник наукових праць. Серія: Радіофізика та іоносфера. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2015, № 37 (1146). – С. 79–86.
6. Мирошников А. Е. Формат данных системы обработки сигналов на промежуточной частоте радара НР / А. Е. Мирошников // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Радіофізика та іоносфера. – 2017. – № 47 (1268). – С. 57–60.
7. Domnin I. F. Dynamics of the ionospheric plasma above Kharkiv during the January 4, 2011 solar eclipse / I. F. Domnin, L. Ya Emelyanov, L. F. Chernogor // Radio Physics and Radio Astronomy. – 2012, – V. 3, N. 4, – P. 311–324. DOI: 10.1615/RadioPhysicsRadioAstronomy.v3.i4.50.
8. Bogomaz O. Advances in software for analysis of Kharkiv incoherent scatter radar data / O. Bogomaz, D. Kotov, S. Panasenko, L. Emelyanov // 2017 International Conference on Information and Telecommunication Technologies and Radio Electronics (UkrMiCo)

11–15 Sept. 2017, Odesa, Ukraine, IEEE Conference Publications, – 2017, – P. 531–535. DOI: 10.1109/UkrMico.2017.8095425.

References (transliterated)

1. Evans J. V. Theory and practice of ionosphere study by Thomson scatter radar. *Proceedings of the IEEE*, vol. 57, no 4, 1969, pp. 496–530. DOI: 10.1109/PROC.1969.7005.
2. Domnin I. F., Cherpurnyy Ya. M., Emelyanov L. Ya. et al. Kharkiv Incoherent Scatter Facility. *Bulletin of the National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”. Scientific papers. Issue: Radiophysics and ionosphere*. Kharkiv, NTU “KhPI”, 2014, no. 47 (1089), pp. 28–42.
3. Emelyanov L. Ya., Lyalyuk A. I., Rogozhkin E. V. Osobennosti obrabotki signalov nekogerentnogo rasseyaniya na radare Instituta ionosfery [Features of signal processing of incoherent scattering on the radar of the Institute of the Ionosphere] *Radiotekhnika: Vseukr. mezhved. nauch.-tekhn. sb.* [Radio Engineering: All-Ukrainian. Intermediate Scientific-tech. Bull.], 2015, vol. 182, pp. 29–33.
4. Emelyanov L., Miroshnikov A., Domnin I., Rogozhkin E. Features of signals reception and processing at the Kharkiv Incoherent Scatter Radar. 2018 International Conference on Information and Telecommunication Technologies and Radio Electronics (UkrMiCo) 17–20 Sept. 2018, Odesa, Ukraine, *IEEE Conference Publications*, – 2018.
5. Emelyanov L. Ya., Bogomaz A. V., Kasymov I. M. Kvaziopitmal'nyy priem signalov nekogerentnogo rasseyaniya [Quasioptimal reception of the incoherent scatter signals]. *Visn. Nats. tekhn. in-tu «Kharkivs'kyi politekhnichnyi institut». Zbirnyk naukovikh prats'. Seriya: Radiofizyka ta ionosfera* [Bulletin of the National Technical University “KhPI”. Series: Radiophysics and Ionosphere]. Kharkiv, NTU “KhPI” Publ., 2015, no. 37 (1146), pp. 79–86.
6. Miroshnikov A. E. Format dannykh sistemy obrabotki signalov na promezhutochnoy chastote radara NR [The data format of the signal processing system at the intermediate frequency of the HP radar]. *Visn. Nats. tekhn. in-tu «Kharkivs'kyi politekhnichnyi institut». Zbirnyk naukovikh prats'. Seriya: Radiofizyka ta ionosfera* [Bulletin of the National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”. Scientific papers. Issue: Radiophysics and ionosphere]. Kharkiv, NTU “KhPI”, 2017, no. 47 (1268), pp. 57–60.
- News of the National Technical University “KhPI”. *Radiofizyka and the atmosphere*. –2017. - no. 47 (1268), pp. 57–60.
7. Domnin I. F., Emelyanov L. Ya., Chernogor L. F. Dynamics of the ionospheric plasma above Kharkiv during the January 4, 2011 solar eclipse”. *Radio Physics and Radio Astronomy*. 2012, vol. 3, no. 4, pp. 311–324. DOI: 10.1615/RadioPhysicsRadioAstronomy.v3.i4.50.
8. Bogomaz O., Kotov D., Panasenko S., Emelyanov L. Advances in software for analysis of Kharkiv incoherent scatter radar data. 2017 International Conference on Information and Telecommunication Technologies and Radio Electronics (UkrMiCo) 11–15 Sept. 2017, Odesa, Ukraine, *IEEE Conference Publications*, 2017, pp. 531–535. DOI: 10.1109/UkrMico.2017.8095425.

Поступила (received) 31.10.2018

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Емельянов Леонід Якович (Emelyanov Leonid Yakovlevich) – кандидат фізико-математичних наук, старший науковий співробітник, Інститут іоносфери НАН і МОН України, завідувач відділу; м. Харків; Україна; ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-2117-2675>; e-mail: leonid.ya.emelyanov@gmail.com.

Мирошников Артем Євгенович (Miroshnikov Artem Yevgenyovych) – Інститут іоносфери НАН і МОН України, м.н.с.; м. Харків, Україна; e-mail: iion@kpi.kharkov.ua.

Колодяжний В'ячеслав Валерійович (Kolodiazhnyi Viacheslav Valeriiovych) – Інститут іоносфери НАН і МОН України, інженер-електронік I категорії; м. Харків; Україна; e-mail: iion@kpi.kharkov.ua.

С. В. ГРИНЧЕНКО

РАСЧЁТ МОМЕНТОВ ВРЕМЕНИ ВОСХОДА И ЗАХОДА СОЛНЦА ПУТЁМ ЗАДАНИЯ ДАННЫХ ЧЕТЫРЁХЛЕТНЕГО ЦИКЛА ИЗМЕНЕНИЙ СОЛНЕЧНОГО СКЛОНЕНИЯ И МЕСТНОГО ВРЕМЕНИ ВЕРХНЕЙ КУЛЬМИНАЦИИ

Проведен математический анализ существования решения уравнения для вычисления моментов времени и азимутов восхода и захода светил. Для компьютерного вычисления моментов времени и азимутов восхода и захода Солнца предложено использовать файлы данных четырёхлетнего цикла изменения склонения и местного времени верхней кульминации Солнца. Это позволяет избежать использования эмпирических формул вычисления склонения и местного времени верхней кульминации Солнца, вносящих дополнительные погрешности в вычисление координат Солнца. Числовые данные файлов задаются с точностью до угловых и временных минут. Проиллюстрированы годовые вариации склонения и местного времени верхней кульминации Солнца. Показано, что учёт вариаций местного времени верхней кульминации Солнца может привести к погрешностям вычисления моментов времени восхода и захода, достигающим значений около 15-ти минут. Указаны корректирующие поправки в вычислении моментов времени восхода и захода при использовании геоцентрических координат. По представленным формулам расчёта моментов восхода и захода Солнца с помощью написанной на *Visual Fortran* программы представлены результаты расчётов в течение года с учётом рефракции света и углового размера солнечного диска. Вычисляемые значения зенитного расстояния Солнца, а также моменты времени восхода и захода Солнца имеют погрешность до 1-ой минуты (угла и времени соответственно). Показано, что даты, имеющие самый ранний восход, сдвинуты на несколько суток от дат, характеризующихся самым поздним в году заходом. Аналогично, сутки с самым поздним восходом отличаются от суток с самым ранним заходом. Показаны области применения астрономических расчётов координат движения Солнца по небесной сфере в задачах теоретического моделирования ионосферных параметров. Указаны особенности проведения астрономических расчётов зенитного угла Солнца с целью последующего вычисления скорости ионизации, вызванные отличием длин волн видимого диапазона и экстремального ультрафиолета, ионизирующего нейтральные газы атмосферы.

Ключевые слова: движение Солнца по небесной сфере, местное время, поясное время, всемирное время, время восхода и захода, склонение Солнца, время верхней кульминации Солнца.

С. В. ГРИНЧЕНКО

РОЗРАХУНОК МОМЕНТІВ ЧАСУ СХОДУ ТА ЗАХОДУ СОНЦЯ ШЛЯХОМ ЗАДАННЯ ЧОТИРИРІЧНОГО ЦИКЛУ ЗМІН СОНЯЧНОГО СХИЛЕННЯ ТА МІСЦЕВОГО ЧАСУ ВЕРХНЬОЇ КУЛЬМІНАЦІЇ

Проведено математичний аналіз існування рішення рівняння для обчислення моментів часу та азимутів сходу і заходу світил. Для комп'ютерного обчислення моментів часу та азимутів сходу і заходу Сонця запропоновано використовувати файли даних чотирирічного циклу зміни схилення і місцевого часу верхньої кульмінації Сонця. Це дозволяє уникати використання емпіричних формул обчислення схилення і місцевого часу верхньої кульмінації Сонця, що вносять додаткові похибки в обчислення координат Сонця. Числові дані файлів задаються з точністю до кутових і часових хвилин. Проілюстровано річні варіації схилення і місцевого часу верхньої кульмінації Сонця. Показано, що неврахування варіацій місцевого часу верхньої кульмінації Сонця може привести до похибок обчислення моментів часу сходу і заходу, які досягають значень близько 15-ти хвилин. Вказані коригувальні поправки для обчислення моментів часу сходу і заходу при використанні геоцентричних координат. За представленими формулами розрахунку моментів сходу і заходу Сонця за допомогою написаної на *Visual Fortran* програми представлені результати розрахунків протягом року з урахуванням рефракції світла та кутового розміру сонячного диску. Обчислювані значення зенітної відстані Сонця, а також моменти часу сходу і заходу Сонця мають похибку до 1-ї хвилини (кута і часу відповідно). Показано, що дати, які мають найбільш ранній схід, є зсунутими на кілька діб від дат, що характеризуються самим пізнім у році заходом. Аналогічно, доба з самим пізнім сходом відрізняється від доби з найбільш раннім заходом. Показано сфери застосування астрономічних розрахунків координат руху Сонця по небесній сфері у задачах теоретичного моделювання іоносферних параметрів. Вказано особливості проведення астрономічних розрахунків зенітного кута Сонця з метою подальшого обчислення швидкості іонізації, викликані відмінністю довжин хвиль видимого діапазону і екстремального ультрафіолету, що іонізують нейтральні гази атмосфери.

Ключові слова: рух Сонця по небесній сфері, місцевий час, поясний час, всесвітній час, час сходу та заходу, схилення Сонця, час верхньої кульмінації Сонця.

S. V. GRINCHENKO

CALCULATION OF THE RISING AND SETTING TIMES OF THE SUN BY SETTING THE DATA OF THE FOUR-YEAR CYCLE OF SOLAR DECLINATION AND LOCAL TIME OF THE UPPER CULMINATION

A mathematical analysis of the existence of a solution of equation for calculating times and azimuths of rising and setting of stars is carried out. For computer calculation of the rising and setting time and azimuths it is offered to use the data files of the four-year cycle of change of declination and local time of the upper culmination of the Sun. It allows avoiding the empirical formulas of calculation of declination and local time of the upper culmination, which introduce additional errors in the calculation of the coordinates of the Sun. Numeric data of files are set to within angular and time minutes. The annual variations of the declination and local time of the upper culmination of the Sun are illustrated. It is shown that the neglect of variations of the local time of the upper culmination of the Sun can result in the errors of calculation of rising and setting times, reaching values about 15 minutes. The corrections are specified in the formula for calculation of the rising and setting times at the use of geocentric coordinates. According to the presented formulas for calculating the sunrise and sunset times by means of the program written in *Visual Fortran*, the results of calculations within a year are presented, taking into account the refraction of light and the angular size of the solar disk. The calculated values of the zenith distance of the Sun and rising and setting times have errors to 1 minute (angle and time, respectively). It is shown, that the dates having the earliest rising, are shifted for some days from the dates characterized by latest setting in year. Similarly, days with the latest rising differ from days with the earliest setting. The applications of astronomical calculations of the Sun coordinates in the problems of theoretical ionosphere simulation are shown. The

features of realization of the astronomic calculations of zenith angle of a Sun with the purpose of subsequent calculation of the ionization rate, caused by the difference in the wavelengths of the visible range and the extreme ultraviolet ionizing the neutral gases of the atmosphere, are indicated.

Keywords: motion of the Sun on the celestial sphere, local time, standard time, universal time, rising and setting times, declination of the Sun, time of the upper culmination of the Sun.

Введение. Особенности вычисления зенитного угла Солнца и моментов восхода и захода в задачах ионосферного моделирования. Астрономическая задача вычисления координат Солнца актуальна, в частности, при решении задач эмпирического и теоретического моделирования ионосферы. Блок астрономических расчётов координат движения Солнца по небесной сфере необходим для любой программы теоретического моделирования ионосферных параметров. Значения зенитного угла Солнца требуются, например, при теоретическом расчёте скорости ионообразования [1–3].

Вычисление зенитного угла Солнца с целью последующего вычисления скорости ионообразования имеет некоторые особенности. Так как в дневное время лучи света, ионизирующие нейтральные газы атмосферы, не проходят приземные слои, то учёт рефракции при расчёте зенитного угла Солнца не требуется. При расчёте ионообразования, когда Солнце находится ниже математического горизонта ионосферных высот, и солнечные лучи проходят через приземную атмосферу, рефракцией света также можно пренебречь, учитывая то, что волны экстремального ультрафиолета (10–120 нм) существенно короче волн видимого света (380–780 нм).

При рассмотрении в ионосферных исследованиях моментов времени восхода и захода Солнца следует иметь в виду, что на ионизацию оказывают влияние восход и заход на уровне горизонта ионосферных высот (совпадающие по времени с восходом и заходом на уровне поверхности Земли), а не появление и исчезновение Солнца на ионосферных высотах, когда солнечные лучи теряют свою ионизирующую способность при прохождении через приземные слои атмосферы.

Новизна работы. Сама по себе задача вычисления времени восхода и захода Солнца является классической. Однако, несмотря на множество книг по астрономии [5–13], в которых рассматривается задача вычисления моментов времени восхода и захода светил (в частности, и Солнца), в них опускаются некоторые математические выкладки, связанные с этой задачей. Новизна предлагаемой работы, в частности, как раз и заключается в математическом анализе наличия решения уравнения для вычисления моментов времени восхода и захода светил.

Другая новизна состоит в использовании файлов данных четырёхлетнего цикла изменения склонения и местного времени верхней кульминации Солнца. Вместо вычислений этих параметров компьютерная программа считывает эти данные из файлов. Это позволяет избавиться от погрешностей вычисления склонения и местного времени верхней кульминации Солнца по эмпирическим формулам. Числовые

данные файлов задаются с точностью до угловых и временных минут. Поэтому и вычисляемые значения зенитного расстояния Солнца, а также моменты времени восхода и захода Солнца имеют погрешность до 1 мин (угла и времени соответственно).

Вычисление зенитного угла светил в топоцентрических координатах. В астрономической справочной литературе даются геоцентрические координаты светил, т. е. координаты для воображаемого наблюдателя, находящегося в центре Земли. Согласно формулам перехода от координат первой экваториальной системы (склонения δ и часового угла t) к координатам горизонтальной системы координат (зенитного расстояния z и азимута A) зенитное расстояние какого-либо светила [4–6]:

$$\cos z = \sin \delta \cdot \sin \varphi + \cos \delta \cdot \cos \varphi \cdot \cos t,$$

где φ – широта точки наблюдения.

Координаты светил, используемые в этой формуле, являются топоцентрическими координатами, т. е. координатами для наблюдателя, находящегося на поверхности Земли. Топоцентрический и геоцентрический зенитные расстояния светила отличаются друг от друга (рис. 1).

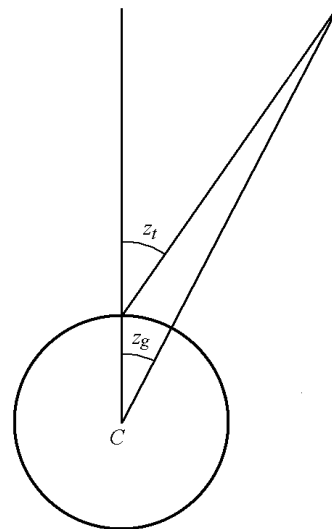


Рис. 1. Топоцентрическое и геоцентрическое зенитные расстояния светила

Вычисление зенитного угла Солнца. Зенитный угол Солнца:

$$\begin{aligned} \cos z &= \sin \delta \cdot \sin \varphi + \cos \delta \cdot \cos \varphi \cdot \cos t = \\ &= \sin \delta \cdot \sin \varphi + \cos \delta \cdot \cos \varphi \cdot \cos(T_m - T_{up.cul.}), \end{aligned}$$

где T_m – местное время данного меридиана в угловой мере; $T_{up.cul.}$ – местное время верхней кульминации Солнца.

Тогда

$$\cos z = \sin \delta \cdot \sin \varphi + \cos \delta \cdot \cos \varphi \cdot \cos 15^\circ(T_m - T_{up.cul.}),$$

где T_m и $T_{m\text{up.cul.}}$ измеряются в часах.

Местное время данного меридиана T_m и местное время верхней кульминации Солнца $T_{m\text{up.cul.}}$ переобозначим с целью упрощения записи формул: $T_m = LT$ и $T_{m\text{up.cul.}} = LT_0$.

$$\begin{aligned} \text{Тогда } \cos z &= \sin \delta \cdot \sin \varphi + \cos \delta \cdot \cos \varphi \cdot \cos t = \\ &= \sin \delta \cdot \sin \varphi + \cos \delta \cdot \cos \varphi \cdot \cos 15^\circ (LT - LT_0). \end{aligned}$$

Условие наличия восхода и захода светила. Направление оси мира в системе небесных координат при любом положении наблюдателя на земной поверхности не меняется. При перемещении наблюдателя по земной поверхности направление отвесной линии меняется и составляет различные углы с осью вращения. Взаимное расположение кругов и точек небесной сферы, связанных с осью мира и с отвесной линией, зависит, следовательно, от направления отвесной линии, т. е. от положения наблюдателя на поверхности Земли. При этом справедливо следующее утверждение: высота h_p полюса мира всегда равна астрономической широте φ места наблюдения [7, 8]. Справедливость этого утверждения непосредственно следует из рисунка 2, на котором $\angle PON = h_p$ и $\angle OCq = \varphi$ – углы со взаимно перпендикулярными сторонами.

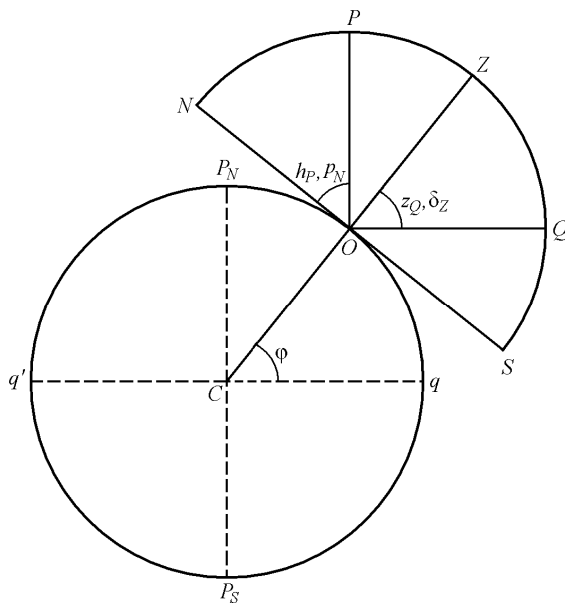


Рис. 2. Сечение небесной сферы и поверхности Земли в плоскости небесного меридиана

Так как высота h_p полюса мира (точки P) равна астрономической широте φ места наблюдения: $h_p = \varphi$, то зенитное расстояние z_Q верхней точки экватора (точки Q) также равно астрономической широте φ места наблюдения: $z_Q = \varphi$. Высота h_p полюса мира и зенитное расстояние z_Q верхней точки экватора являются элементами горизонтальной системы небесных координат.

Полярное расстояние p_N точки севера (точки N) в первой экваториальной системе координат есть высота h_p полюса мира (точки P) в горизонтальной системе небесных координат. Поэтому $p_N = \varphi$.

Склонение δ_z зенита (точки Z) в первой экваториальной системе координат есть зенитное расстояние z_Q верхней точки экватора (точки Q) в горизонтальной системе небесных координат. Поэтому $\delta_z = \varphi$.

Таким образом, в горизонтальной системе координат небесной сферы: $h_p = \varphi$, $z_Q = \varphi$. А в первой экваториальной системе координат: $p_N = \varphi$, $\delta_z = \varphi$. Тогда в горизонтальной системе координат: $z_p = 90^\circ - \varphi$, $h_Q = 90^\circ - \varphi$. А в первой экваториальной системе координат: $\delta_N = 90^\circ - \varphi$, $p_Z = 90^\circ - \varphi$.

Суточные параллели светил, движущихся по небесной сфере, либо пересекают математический горизонт в двух точках, либо целиком располагаются над ним, либо находятся под ним. Это явление зависит от положения суточной параллели вдоль оси мира небесной сферы, задаваемого величиной склонения δ , и степени наклона оси мира к математическому горизонту, определяемой величиной высоты $h_p = \varphi$ северного полюса мира, т. е. географической широтой φ места наблюдения. Точка пересечения светилом восточной части истинного горизонта является точкой восхода светила, точка пересечения западной части истинного горизонта – точкой захода светила.

Если склонение светила равно нулю ($\delta = 0$), т. е. его суточная плоскость совпадает с небесным экватором, то оно восходит точно в точке востока и заходит точно в точке запада. Для положительных значений географической широты, светила со значениями склонения $\delta > 0$ восходят на северо-востоке и заходят на северо-западе, а светила со значениями склонения $\delta < 0$ восходят на юго-востоке и заходят на юго-западе.

На рисунке 3 изображено сечение небесной сферы в плоскости небесного меридиана. Пусть точка наблюдения (центр небесной сферы) характеризуется положительным значением географической широты φ . Для данного значения широты $\varphi > 0$ светила, чье склонение удовлетворяет неравенству $|\delta| < 90^\circ - \varphi$, имеют точки восхода и захода. Светила со склонениями $\delta = \pm(90^\circ - \varphi)$ при движении по суточным параллелям касаются горизонта. Для данного положительного значения географической широты φ суточные параллели светил с положительными склонениями $\delta > 90^\circ - \varphi$ располагается над горизонтом, а суточные параллели светил со склонениями $\delta < -(90^\circ - \varphi)$ располагаются под горизонтом.

Для общего случая любого знака широты условие того, что суточная параллель светила имеет

точки восхода и захода (светило восходит и заходит), имеет вид: $|\delta| < 90^\circ - |\varphi|$. Если $|\delta| > 90^\circ - |\varphi|$, то суточная параллель светила не пересекает математический горизонт и светило является либо незаходящим (суточная параллель располагается целиком над горизонтом) либо невосходящим (суточная параллель располагается целиком под горизонтом).

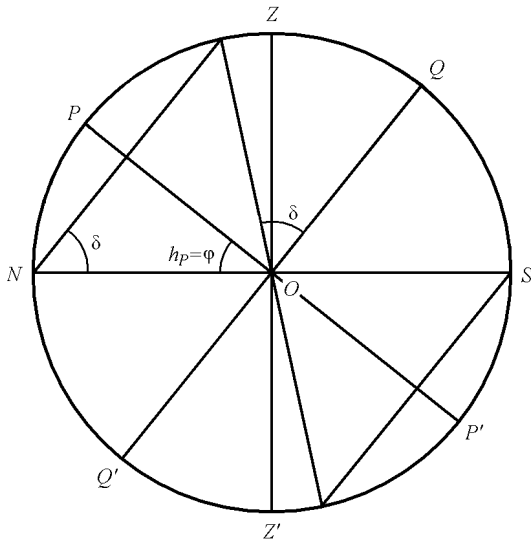


Рис. 3. Касание суточной параллели математического горизонта

Анализ наличия решения уравнения для вычисление моментов времени восхода и захода светила. В моменты времени восхода и захода светила:

$$\cos(90^\circ) = \sin \delta \cdot \sin \varphi + \cos \delta \cdot \cos \varphi \cdot \cos t = 0.$$

Отсюда получаем формулу для вычисления часового угла светила в момент его восхода и захода:

$$\cos t = -\frac{\sin \delta \cdot \sin \varphi}{\cos \delta \cdot \cos \varphi}.$$

Условие того, что суточная параллель светила имеет точки восхода и захода (светило восходит и заходит): $|\delta| < 90^\circ - |\varphi|$.

Исследуем наличие решения у формулы

$$\cos t = -\frac{\sin \delta \cdot \sin \varphi}{\cos \delta \cdot \cos \varphi} = -\frac{\operatorname{tg} \delta}{\operatorname{ctg} \varphi} = -\frac{\operatorname{tg} \delta}{\operatorname{tg}(90^\circ - \varphi)}, \quad \text{т. е.}$$

выполнение неравенства $|\cos t| < 1$ при выполнении условия $|\delta| < 90^\circ - |\varphi|$.

Рассмотрим различные комбинации знаков у величин δ и φ .

1) Пусть $\delta > 0$, $\varphi > 0$. Условие $|\delta| < 90^\circ - |\varphi|$ принимает вид: $\delta < 90^\circ - \varphi$.

Исследуемая формула: $\cos t = -\frac{\operatorname{tg} \delta}{\operatorname{tg}(90^\circ - \varphi)}$.

Учитывая, что $0^\circ < \delta < 90^\circ$, $0^\circ < \varphi < 90^\circ$ (т. е.

$0^\circ < 90^\circ - \varphi < 90^\circ$), получаем, что $\operatorname{tg} \delta > 0$, $\operatorname{tg}(90^\circ - \varphi) > 0$. Поэтому $\cos t = -\frac{\operatorname{tg} \delta}{\operatorname{tg}(90^\circ - \varphi)} < 0$.

Функция $\operatorname{tg} x$ – монотонно возрастающая на интервале $(-90^\circ, +90^\circ)$. Так как $\delta < 90^\circ - \varphi$, то $\operatorname{tg} \delta < \operatorname{tg}(90^\circ - \varphi)$. Учитывая положительность тангенса

$\operatorname{tg}(90^\circ - \varphi)$, получаем, что $\frac{\operatorname{tg} \delta}{\operatorname{tg}(90^\circ - \varphi)} < 1$, $-\frac{\operatorname{tg} \delta}{\operatorname{tg}(90^\circ - \varphi)} > -1$.

Таким образом, $-1 < \cos t = -\frac{\operatorname{tg} \delta}{\operatorname{tg}(90^\circ - \varphi)} < 0$.

Тогда $|\cos t| < 1$.

2) Рассмотрим случай $\delta > 0$, $\varphi < 0$. Условие $|\delta| < 90^\circ - |\varphi|$ принимает вид: $\delta < 90^\circ + \varphi$.

Преобразуем исследуемую формулу:

$$\cos t = -\frac{\operatorname{tg} \delta}{\operatorname{tg}(90^\circ - \varphi)} = \frac{\operatorname{tg} \delta}{\operatorname{tg}(\varphi + 90^\circ)}.$$

Учитывая, что $0^\circ < \delta < 90^\circ$, $-90^\circ < \varphi < 0^\circ$ (т. е. $0^\circ < \varphi + 90^\circ < 90^\circ$), получаем, что $\operatorname{tg} \delta > 0$, $\operatorname{tg}(\varphi + 90^\circ) > 0$. Тогда $\cos t = \frac{\operatorname{tg} \delta}{\operatorname{tg}(\varphi + 90^\circ)} > 0$.

Функция $\operatorname{tg} x$ монотонно возрастает на интервале $(-90^\circ, +90^\circ)$, при этом $\delta < 90^\circ + \varphi$. Следовательно, $\operatorname{tg} \delta < \operatorname{tg}(\varphi + 90^\circ)$. Учитывая положительность тангенса $\operatorname{tg}(\varphi + 90^\circ)$, получаем, что $\frac{\operatorname{tg} \delta}{\operatorname{tg}(\varphi + 90^\circ)} < 1$.

Тогда $0 < \cos t = \frac{\operatorname{tg} \delta}{\operatorname{tg}(\varphi + 90^\circ)} < 1$. Неравенство $|\cos t| < 1$ справедливо.

3) Рассмотрим случай, когда $\delta < 0$, $\varphi > 0$. Условие $|\delta| < 90^\circ - |\varphi|$ принимает вид: $-\delta < 90^\circ - \varphi$, т. е. $\delta > \varphi - 90^\circ$.

Косинус часового угла $\cos t = -\frac{\operatorname{tg} \delta}{\operatorname{tg}(90^\circ - \varphi)} = \frac{\operatorname{tg} \delta}{\operatorname{tg}(\varphi - 90^\circ)}$.

Так как $-90^\circ < \delta < 0^\circ$, $0^\circ < \varphi < 90^\circ$ (т. е. $-90^\circ < \varphi - 90^\circ < 0^\circ$), то $\operatorname{tg} \delta < 0$, $\operatorname{tg}(\varphi - 90^\circ) < 0$.

Косинус $\cos t = \frac{\operatorname{tg} \delta}{\operatorname{tg}(\varphi - 90^\circ)} > 0$.

Так как $\delta > \varphi - 90^\circ$, то $\operatorname{tg} \delta > \operatorname{tg}(\varphi - 90^\circ)$. Учитывая, что $\operatorname{tg}(\varphi - 90^\circ) < 0$, получаем, что

$$\frac{\operatorname{tg} \delta}{\operatorname{tg}(\varphi - 90^\circ)} < 1.$$

Итак, $0 < \cos t = \frac{\operatorname{tg} \delta}{\operatorname{tg}(\varphi - 90^\circ)} < 1$, $|\cos t| < 1$.

4) Рассмотрим случай, когда $\delta < 0$, $\varphi < 0$.
Условие $|\delta| < 90^\circ - |\varphi|$ принимает вид: $-\delta < 90^\circ + \varphi$,
т. е. $\delta > -(90^\circ + \varphi)$.

$$\text{Косинус часового угла } \cos t = -\frac{\text{tg } \delta}{\text{tg}(90^\circ - \varphi)} =$$

$$= \frac{\text{tg } \delta}{\text{tg}(\varphi + 90^\circ)}.$$

Так как $-90^\circ < \delta < 0^\circ$, $-90^\circ < \varphi < 0^\circ$ (т. е. $0^\circ < \varphi + 90^\circ < 90^\circ$), то $\text{tg } \delta < 0$, $\text{tg}(\varphi + 90^\circ) > 0$.

$$\text{Поэтому } \cos t = \frac{\text{tg } \delta}{\text{tg}(\varphi + 90^\circ)} < 0.$$

Из неравенства $-\delta < \varphi + 90^\circ$ следует, что $\text{tg}(-\delta) < \text{tg}(\varphi + 90^\circ)$. Учитывая положительность

второго тангенса, получаем, что $\frac{\text{tg}(-\delta)}{\text{tg}(\varphi + 90^\circ)} < 1$,

$$\frac{\text{tg } \delta}{\text{tg}(\varphi + 90^\circ)} > -1.$$

Таким образом, $-1 < \cos t = \frac{\text{tg } \delta}{\text{tg}(\varphi + 90^\circ)} < 0$,
 $|\cos t| < 1$.

Анализ наличия решения уравнения для вычисление азимутов восхода и захода светил.
Согласно одной из формул перехода от координат (z, A) горизонтальной системы координат к координатам (δ, t) первой экваториальной системы:
 $\sin \delta = \cos z \cdot \sin \varphi - \sin z \cdot \cos \varphi \cdot \cos A$.

В моменты восхода и захода светил топоцентрический зенитный угол $z = 90^\circ$, поэтому:

$$\sin \delta = \cos(90^\circ) \cdot \sin \varphi - \sin(90^\circ) \cdot \cos \varphi \cdot \cos A,$$

$$\sin \delta = -\cos \varphi \cdot \cos A,$$

$$\cos A = -\frac{\sin \delta}{\cos \varphi} = -\frac{\sin \delta}{\sin(90^\circ - \varphi)}.$$

Исследуем наличие решения A полученного уравнения для вычисления азимутов восхода и захода светила при выполнении условия $|\delta| < 90^\circ - |\varphi|$.

Рассмотрим различные случаи знаков величин δ и φ .

1) Пусть $\delta > 0$, $\varphi > 0$. Условие $|\delta| < 90^\circ - |\varphi|$ принимает вид: $\delta < 90^\circ - \varphi$.

$$\text{Исследуемая формула: } \cos A = -\frac{\sin \delta}{\sin(90^\circ - \varphi)}.$$

Учитывая, что $0^\circ < \delta < 90^\circ$, $0^\circ < \varphi < 90^\circ$ (т. е. $0^\circ < 90^\circ - \varphi < 90^\circ$), получаем, что $\sin \delta > 0$, $\sin(90^\circ - \varphi) > 0$. Следовательно,

$$\cos A = -\frac{\sin \delta}{\sin(90^\circ - \varphi)} < 0.$$

Функция $\sin x$ – монотонно возрастающая на интервале $(-90^\circ, +90^\circ)$. Так как $\delta < 90^\circ - \varphi$, то

$\sin \delta < \sin(90^\circ - \varphi)$. Учитывая положительность синуса $\sin(90^\circ - \varphi)$, получаем, что $\frac{\sin \delta}{\sin(90^\circ - \varphi)} < 1$,
 $-\frac{\sin \delta}{\sin(90^\circ - \varphi)} > -1$.

Таким образом, $-1 < \cos A = -\frac{\sin \delta}{\sin(90^\circ - \varphi)} < 0$.

Тогда $|\cos A| < 1$.

2) Рассмотрим случай $\delta > 0$, $\varphi < 0$. Условие $|\delta| < 90^\circ - |\varphi|$ принимает вид: $\delta < 90^\circ + \varphi$.

Преобразуем исследуемую формулу:
 $\cos A = -\frac{\sin \delta}{\sin(90^\circ - \varphi)} = -\frac{\sin \delta}{\sin(\varphi + 90^\circ)}$.

Учитывая, что $0^\circ < \delta < 90^\circ$, $-90^\circ < \varphi < 0^\circ$ (т. е. $0^\circ < \varphi + 90^\circ < 90^\circ$), получаем, что $\sin \delta > 0$, $\sin(\varphi + 90^\circ) > 0$. Поэтому $\cos A = -\frac{\sin \delta}{\sin(\varphi + 90^\circ)} < 0$.

Функция $\sin x$ монотонно возрастает на интервале $(-90^\circ, +90^\circ)$, при этом $\delta < 90^\circ + \varphi$. Следовательно, $\sin \delta < \sin(\varphi + 90^\circ)$. Учитывая положительность синуса $\sin(\varphi + 90^\circ)$, получаем, что

$$\frac{\sin \delta}{\sin(\varphi + 90^\circ)} < 1, \quad -\frac{\sin \delta}{\sin(\varphi + 90^\circ)} > -1.$$

Тогда $-1 < \cos A = -\frac{\sin \delta}{\sin(\varphi + 90^\circ)} < 0$. Неравенство $|\cos A| < 1$ выполняется.

3) Рассмотрим случай, когда $\delta < 0$, $\varphi > 0$. Условие $|\delta| < 90^\circ - |\varphi|$ принимает вид: $-\delta < 90^\circ - \varphi$, т. е. $\delta > \varphi - 90^\circ$.

$$\text{Косинус азимута } \cos A = -\frac{\sin \delta}{\sin(90^\circ - \varphi)} =$$

$$= \frac{\sin \delta}{\sin(\varphi - 90^\circ)}.$$

Так как $-90^\circ < \delta < 0^\circ$, $0^\circ < \varphi < 90^\circ$ (т. е. $-90^\circ < \varphi - 90^\circ < 0^\circ$), то $\text{tg } \delta < 0$, $\text{tg}(\varphi - 90^\circ) < 0$.

$$\text{Косинус } \cos A = \frac{\sin \delta}{\sin(\varphi - 90^\circ)} > 0.$$

Так как $\delta > \varphi - 90^\circ$, то $\sin \delta > \sin(\varphi - 90^\circ)$. Учитывая, что $\sin(\varphi - 90^\circ) < 0$, получаем, что

$$\frac{\sin \delta}{\sin(\varphi - 90^\circ)} < 1.$$

Итак, $0 < \cos A = \frac{\sin \delta}{\sin(\varphi - 90^\circ)} < 1$, $|\cos A| < 1$.

4) Рассмотрим случай, когда $\delta < 0$, $\varphi < 0$. Условие $|\delta| < 90^\circ - |\varphi|$ принимает вид: $-\delta < 90^\circ + \varphi$, т. е. $\delta > -(90^\circ + \varphi)$.

$$\text{Косинус азимута } \cos A = -\frac{\sin \delta}{\sin(90^\circ - \varphi)} = -\frac{\sin \delta}{\sin(\varphi + 90^\circ)}.$$

Так как $-90^\circ < \delta < 0^\circ$, $-90^\circ < \varphi < 0^\circ$ (т. е. $0^\circ < \varphi + 90^\circ < 90^\circ$), то $\sin \delta < 0$, $\sin(\varphi + 90^\circ) > 0$.

$$\text{Поэтому } \cos A = -\frac{\sin \delta}{\sin(\varphi + 90^\circ)} > 0.$$

Из неравенства $-\delta < \varphi + 90^\circ$ следует, что $\sin(-\delta) < \sin(\varphi + 90^\circ)$. Учитывая положительность второго косинуса, получаем, что $\frac{\sin(-\delta)}{\sin(\varphi + 90^\circ)} < 1$,

$$-\frac{\sin \delta}{\sin(\varphi + 90^\circ)} < 1.$$

Таким образом, $0 < \cos A = -\frac{\sin \delta}{\sin(\varphi + 90^\circ)} < 1$, $|\cos A| < 1$.

Корректирующие поправки в вычислении моментов времени восхода и захода при использовании геоцентрических координат. Если какая-нибудь точка небесного свода восходит или заходит, то её видимое зенитное расстояние $z' = 90^\circ$. Её истинное зенитное расстояние z в этот момент вследствие рефракции больше видимого на величину $\rho = 35'$. Скорректированное с учётом рефракции зенитное расстояние точки в момент её восхода или захода равно: $z = z' + \rho = 90^\circ + \rho$.

Кроме того, для Солнца и Луны, имеющих заметные размеры, координаты относятся к центру их видимого диска, а восходом (или заходом) этих светил считается момент появления (или исчезновения) на горизонте верхней точки края диска. Скорректированное с учётом углового размера светила зенитное расстояние центра диска этих светил в момент восхода или захода будет больше зенитного расстояния верхней точки края диска на величину видимого углового радиуса R диска: $z = z' + \rho + R = 90^\circ + \rho + R$. У Солнца и Луны их видимые угловые радиусы приблизительно одинаковы и в среднем равны $16'$.

Скорректированное с учётом параллакса зенитное расстояние точки в момент её восхода или захода равно: $z = z' + \rho + R - p_{hor} = 90^\circ + \rho + R - p_{hor}$.

Таким образом, в общем случае формула для вычисления часового угла светила в момент его восхода и захода имеет следующий вид [9–11]:

$$\begin{aligned} \cos t &= \frac{\cos z - \sin \delta \cdot \sin \varphi}{\cos \delta \cdot \cos \varphi} = \\ &= \frac{\cos(90^\circ + \rho + R - p_{hor}) - \sin \delta \cdot \sin \varphi}{\cos \delta \cdot \cos \varphi}. \end{aligned}$$

Для вычисления часового угла момент восхода или захода Луны задают следующие данные: $\rho = 35'$, $R = 16'$, $p_{hor} \approx p_0 = 57'$. Тогда

$$\begin{aligned} \cos t &= \frac{\cos(90^\circ + 35' + 16' - 57') - \sin \delta \cdot \sin \varphi}{\cos \delta \cdot \cos \varphi} = \\ &= \frac{\cos(89^\circ 54') - \sin \delta \cdot \sin \varphi}{\cos \delta \cdot \cos \varphi}. \end{aligned}$$

Экваториальный горизонтальный параллакс Солнца $p_0 = 8.79''$, угловой радиус $R = 16'$. Пренебрегая значением параллакса Солнца, получаем следующую формулу для вычисления часового угла момент восхода или захода:

$$\begin{aligned} \cos t &= \frac{\cos(90^\circ + 35' + 16') - \sin \delta \cdot \sin \varphi}{\cos \delta \cdot \cos \varphi} = \\ &= \frac{\cos(90^\circ 51') - \sin \delta \cdot \sin \varphi}{\cos \delta \cdot \cos \varphi}. \end{aligned}$$

Годичные вариации склонения и местного времени верхней кульминации Солнца. При расчёте моментов времени восхода и захода Солнца в течение определённого года из файла данных о склонении и времени верхней кульминации извлекаются данные, соответствующие рассчитываемому году. Рисунок 4 иллюстрирует годичные вариации склонения Солнца, соответствующие 2018 году:

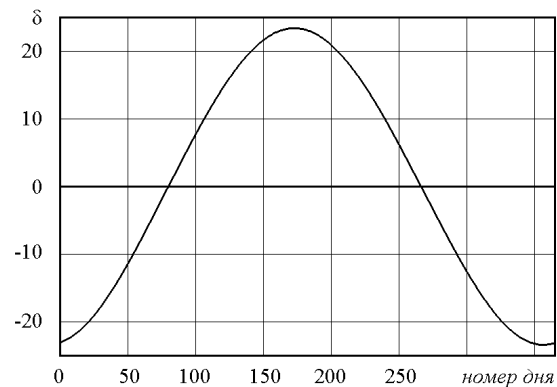


Рис. 4. Изменение склонение Солнца в течение 2018 года

Когда Солнце находится в точке весеннего равноденствия, являющейся одной из двух точек пересечения эклиптики и небесного меридиана, его склонение $\delta = 0^\circ$. Суточное движение Солнца в день весеннего равноденствия проходит приблизительно по небесному экватору. Употребление слова «приблизительно» вызывается тем, что в течение указанных суток склонение отличается от точного нулевого значения. Склонение принимает точное нулевое значение лишь в какой-то один момент суток весеннего равноденствия.

В день весеннего равноденствия (21 марта, годичный номер дня равен 80) Солнце на всех географических широтах земной поверхности восходит (почти) в точке востока и заходит (почти) в точке запада. Половина (с некоторой незначительной погрешностью) его суточного пути находится над горизонтом, половина под горизонтом. На всём земном шаре, кроме полюсов, в этот день продолжительность дня равна продолжительности ночи.

День весеннего равноденствия считается началом весны в северном полушарии Земли. В южном полушарии этот момент соответствует началу осени.

Когда Солнце находится в точке летнего солнцестояния (склонение $\delta = +23^\circ 26'$), то оно восходит на данной северной широте φ на северо-востоке, а заходит на северо-западе. Большая часть его суточного пути находится над горизонтом. Продолжительность дня в северном полушарии Земли максимальная, а ночи – минимальная; в южном полушарии – наоборот. День летнего солнцестояния (около 22 июня, номер дня $n = 73$) считается началом лета в северном полушарии Земли (в южном полушарии этот момент соответствует началу зимы).

Когда Солнце находится в точке осеннего равноденствия ($\delta = 0^\circ$), то оно снова на всей Земле восходит в точке востока и заходит в точке запада, и снова на всех широтах, кроме полюсов, продолжительность дня равна продолжительности ночи. Этот день называется днем осеннего равноденствия (22 сентября, $n = 265$), и считается началом осени в северном полушарии Земли (началом весны – в южном полушарии).

Наконец, когда Солнце находится в точке зимнего солнцестояния (склонение $\delta = -23^\circ 26'$), то оно восходит на юго-востоке, а заходит на юго-западе. Большая часть его суточного пути находится под горизонтом. На данной северной географической широте φ продолжительность дня минимальна, в ночи – максимальна (в южных широтах, наоборот, продолжительность дня максимальна, ночи – минимальна). День зимнего солнцестояния (около 22 декабря, $n = 356$) считается началом зимы в северном полушарии Земли (началом лета – в южном полушарии).

На рис. 5 представлены годовые вариации местного времени верхней кульминации Солнца. Местное время верхней кульминации Солнца изменяется в пределах от $11^h 44^m$ среднего солнечного времени до $12^h 14^m$. Неучёт вариаций местного времени верхней кульминации Солнца может привести к погрешностям вычисления моментов времени восхода и захода, достигающими значений около 15 мин.

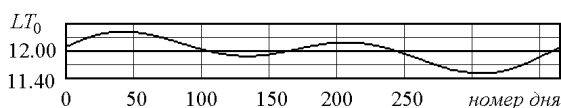


Рис. 5. Изменение местного времени верхней кульминации Солнца в течение 2018 года

Результаты расчёты моментов времени захода и захода Солнца в течение года. На рис. 6 представлены результаты расчётов местного времени моментов восхода и захода Солнца по краю диска с учётом рефракции видимого диапазона света. Широта места наблюдения определялась местоположением радара некогерентного рассеяния (НР) Института ионосферы ($\varphi = 49^\circ 40'$ с.ш. = $2980'$ с.ш.; $\lambda = 36^\circ 18'$

в.д. = $2178'$ в.д.). Самый ранний восход наблюдается 17 июня ($n = 168$), местное время $LT = 3^h 51^m$. Самый поздний заход – 25 июня ($n = 176$), $LT = 20^h 12^m$.

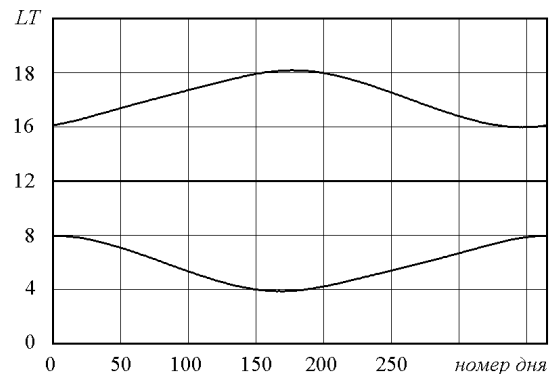


Рис. 6. Ход местного времени моментов восхода и захода Солнца в течение 2018 года

Всемирное время восхода 17 июня

$$UT = LT - \lambda = LT - \left(\frac{2178}{15}\right)^m = LT - 145^m =$$

$$= LT - 2^h 25^m = 1^h 26^m.$$

Поясное время восхода
 $T_n = UT + n = UT + 2^h = 3^h 26^m$. Здесь долгота λ и номер пояса n измеряются во временной мере.

Всемирное время захода 25 июня
 $UT = LT - 2^h 25^m = 17^h 47^m$. Соответствующее поясное время $T_n = UT + 2^h = 19^h 47^m$.

Выводы. Проведен математический анализ наличия решения уравнения для вычисления моментов времени восхода и захода светил. Точность расчётов определяется точностью эмпирических данных и равна 1 мин.

По представленным формулам расчёта моментов восхода и захода Солнца с помощью программы, написанной на *Visual Fortran*, проведены расчёты моментов времени восхода и захода Солнца в точке местоположения радара НР Института ионосферы и построены соответствующие графические изображения.

Представлены некоторые численные данные для возможности сравнить их с другими программами расчёта моментов времени восхода и захода Солнца.

Коды расчётов зенитного угла Солнца и моментов времени восхода и захода Солнца используются автором статьи в программах теоретического моделирования ионосферы.

Список литературы

1. Grinchenko S. V., Dziubanov D. A., Ziuzgina Iu. E. Simulation of ionospheric plasma velocity along the geomagnetic field lines due to the horizontal neutral winds. *Вісник Нац. техн. ун-ту «Харк. політехн. ін.-т»: зб. наук. пр.* Харків: НТУ «ХПИ», 2014. № 47 (1089): *Радіофізика та іоносфера*. С. 99–103.
2. Grinchenko S. V. Influence of neutral winds on the formation of the F2-region of the middle-latitude magnetically quiet ionosphere. *Proceedings of the 9th International Kharkiv Symposium on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Submillimeter*

- Waves*. Kharkiv, Ukraine, June 20–24, 2016. United States. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., pp. 1–4. / IEEE Catalog Number CFP16780–CDR. ISBN 978–1–5090–2266–3. INSPEC Accession Number: 16215104. doi: 10.1109/MSMW.2016.7538023.
- Гринченко С. В. Решение уравнения непрерывности квазиравновесного распределения ионов атомарного кислорода при теоретическом моделировании электронной концентрации F2-области ионосферы. *Вісник Нац. техн. ун-ту «Харк. політехн. ін.-т»: зб. наук. пр. Харків: НТУ «ХПІ», 2017. № 47 (1268):* Радиофізика та іоносфера. С. 33–43.
 - Александров Ю. В. *Небесная механика*. Харьков. Харьк. нац. ун-т им. В. Н. Каразина. 2006. 256 с.
 - Karttunen H., Kroger P., Oja H., Poutanen M., Donner K. J. *Fundamental Astronomy*. 5th Ed. Berlin: Springer. 2007. 510 p.
 - Smart W. M., Green R. M. *Textbook on Spherical Astronomy*. 6th Ed. Glasgow: University of Glasgow. 1976. 443 p.
 - Бакулин П. И., Кононович Э. В., Мороз В. И. *Курс общей астрономии*. Изд. 4–е. М.: Наука. 1977. 544 с.
 - Кононович Э. В., Мороз В. И. *Общий курс астрономии*. Изд. 2–е. М.: Едиториал URSS. 2004. 544 с.
 - Даффет-Смит П. *Практическая астрономия с калькулятором*. М.: Мир. 1982. 176 с.
 - Клищенко А. П., Шупляк В. И. *Астрономия*. М.: Новое знание. 2004. 224 с.
 - Шупляк В. И., Шундалов М. Б., Клищенко А. П., Малышиц В. В. *Астрономия*. Минск: Вышэйшая школа. 2016. 310 с.
 - Dandy J. M. A. *Fundamental of Celestial Mechanics*. Richmond: Willmann–Bell, Inc. 1992. 483 p.
 - Roy A. E., Clarke D. *Astronomy: Principles and Practice*. 4th Ed. Bristol and Philadelphia: Taylor & Francis Group. 2003. 475 p.

References (transliterated)

- Grinchenko S. V., Dziubanov D. A., Ziuzgina Iu. E. Simulation of ionospheric plasma velocity along the geomagnetic field lines due to the horizontal neutral winds. *Vestnik Natsionalnogo tekhnichnogo universitetu "Kharkivskii politekhnichnyi instytut": zbirnyk naukovykh prats*. [Bulletin of National technical university "Kharkiv polytechnical institute: a collection of scientific papers]. Kharkiv: NTU "KhPI", 2014, no. 47 (1089): Radiophysyka ta ionosfera [Radiophysics and ionosphere], pp. 99–103.
- Grinchenko S. V. Influence of neutral winds on the formation of the F2-region of the middle-latitude magnetically quiet ionosphere.

- Proceedings of the 9th International Kharkiv Symposium on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Submillimeter Waves*. Kharkiv, Ukraine, June 20–24, 2016. United States. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., pp. 1–4. / IEEE Catalog Number CFP16780–CDR. ISBN 978–1–5090–2266–3. INSPEC Accession Number: 16215104. doi: 10.1109/MSMW.2016.7538023.
- Grinchenko S. V. Reshenie uravneniia nepreryvnosti kvaziravnovesnogo raspredeleniia ionov kisloroda pri teoreticheskom modelirovanii jelektronnoj kontsentratsii F2-oblasti ionosfery [The solution of the continuity equation of the quasi-equilibrium atomic oxygen ions distribution for the theoretical simulation of the F2 region electron density]. *Vestnik Natsionalnogo tekhnichnogo universitetu "Kharkivskii politekhnichnyi instytut": zbirnyk naukovykh prats*. [Bulletin of National technical university "Kharkiv polytechnical institute: a collection of scientific papers]. Kharkiv: NTU "KhPI", 2017, no. 47 (1268): Radiophysyka ta ionosfera [Radiophysics and ionosphere], pp. 33–43.
 - Aleksandrov Ju. V. *Nebesnaya mekhanika* [Celestial mechanics]. Kharkov, Kharkovskij natsionalnyj universitet imeni V. N. Karazina. 2006. 256 p
 - Karttunen H., Kroger P., Oja H., Poutanen M., Donner K. J. *Fundamental Astronomy*. 5th Ed. Berlin, Springer, 2007. 510 p.
 - Smart W. M., Green R. M. *Textbook on Spherical Astronomy*. 6th Ed. Glasgow, University of Glasgow, 1976. 443 p.
 - Bakulin P. I., Kononovich Je. V. *Kurs obshchej astronomii* [Course of general astronomy]. Izdanie 4. Moskva, Nauka, 1977. 544 p.
 - Kononovich Je. V., Moroz V. I. *Obshchij kurs astronomii* [General course of astronomy]. Izdanie 2. Moskva, Editorial URSS, 2004. 544 p.
 - Daffet-Smit P. *Prakticheskaya astronomiia s kalkulyatorom* [Practical astronomy with calculator]. Moskva, Mir, 1982. 176 p.
 - Klishchenko A. P., Shchupliak V. I. *Astronomiia* [Astronomy]. Moskva, Novoe znanie, 2004. 224 p.
 - Shchupliak V. I., Shundalov M. B., Klishchenko A. P., Malyshevs V. V. *Astronomiia* [Astronomy]. Minsk, Vyshhejskaia shkola, 2016. 310 p.
 - Dandy J. M. A. *Fundamental of Celestial Mechanics*. Richmond, Willmann–Bell, Inc, 1992. 483 p.
 - Roy A. E., Clarke D. *Astronomy: Principles and Practice*. 4th Ed. Bristol and Philadelphia, Taylor & Francis Group, 2003. 475 p.

Поступила (received) 31.10.2018

Відомості про автора / Сведения об авторе / About the Author

Грінченко Сергій Володимирович (Grinchenko Sergii Vladimirovich, Grinchenko Sergii Volodymyrovych) – Інститут іоносфери НАН та МОН України, науковий співробітник; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2433-4235>; e-mail: svgrinchenko@gmail.com.

УДК 621:31

С. С. КОЗЛОВ**АНАЛІЗ РЕЖИМІВ ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯ КОМПЛЕКСУ НЕКОГЕРЕНТНОГО РОЗСІЯННЯ ІНСТИТУТУ ІОНОСФЕРИ НАН І МОН УКРАЇНИ**

У даній статті представлені результати аналізу режимів енергоспоживання комплексу некогерентного розсіяння Інституту іоносфери НАН і МОН України з метою вирішення проблеми підвищення енергоефективності науково-дослідного комплексу та створення енергоефективної системи електропостачання, яка забезпечить стійку роботу наукового обладнання для виконання дослідницьких програм НАН України. Описана система електроживлення комплексу та режими енергоспоживання комплексу. Описано пристрої радарної системи, а також найбільш потужні споживачі електроенергії, які споживають електроенергію на експериментальні і господарські потреби. Проаналізовано енергоспоживання комплексу некогерентного розсіяння за 2013 р. Отримано і представлено графіки середньої споживаної потужності (середньодобовий показник) і середньої споживаної потужності в режимі вимірювань. Описана доцільність проведення робіт з оптимізації енергопостачання науково-дослідного комплексу Інституту іоносфери. Запропоновано можливі заходи для зниження економічної вартості проведення експериментів з дослідження іоносфери науково-дослідного комплексу некогерентного розсіяння. Проведено аналіз робіт сучасних авторів з метою показати, що підвищення ефективності функціонування систем електропостачання є актуальною проблемою сучасних досліджень.

Ключові слова: іоносфера, радар некогерентного розсіяння, режими вимірювань, система електропостачання, енергоспоживання, енергоефективність, середня споживана потужність.

С. С. КОЗЛОВ**АНАЛИЗ РЕЖИМОВ ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЯ КОМПЛЕКСА НЕКОГЕРЕНТНОГО РАССЕЯНИЯ ИНСТИТУТА ИОНОСФЕРЫ НАН И МОН УКРАИНЫ**

В данной статье представлены результаты анализа режимов энергопотребления комплекса некогерентного рассеяния Института ионосферы НАН и МОН Украины с целью решения проблемы повышения энергоэффективности научно-исследовательского комплекса и создания энергоэффективной системы электроснабжения, которая обеспечит устойчивую работу научного оборудования для выполнения исследовательских программ НАН Украины. Описана система электропитания комплекса и режимы энергопотребления комплекса. Описаны устройства радарной системы, а так же наиболее мощные потребители электроэнергии, которые расходуют электроэнергию на экспериментальные и хозяйственные нужды. Проанализировано энергопотребление комплекса некогерентного рассеяния за 2013 г. Получены и представлены графики средней потребляемой мощности (среднесуточный показатель) и средней потребляемой мощности в режимах измерений. Описана целесообразность проведения работ по оптимизации энергоснабжения научно-исследовательского комплекса института ионосферы. Предложены возможные меры для снижения экономической стоимости проведения экспериментов по исследованию ионосферы научно-исследовательского комплекса некогерентного рассеяния. Проведен анализ работ современных авторов с целью показать, что повышение эффективности функционирования систем электроснабжения является актуальной проблемой современных исследований.

Ключевые слова: ионосфера, радар некогерентного рассеяния, режимы измерений, система электроснабжения, энергопотребление, энергоэффективность, средняя потребляемая мощность.

С. С. КОЗЛОВ**ANALYSIS OF THE MODES OF ENERGY CONSUMPTION OF THE COMPLEX OF AN INCOHERENT SCATTERING OF THE INSTITUTE OF IONOSPHERE OF NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES AND THE MINISTRY OF EDUCATION AND SCIENCE OF UKRAINE**

This article presents the results of the analysis of the energy consumption modes of the incoherent scattering complex of the Institute of Ionosphere of the National Academy of Sciences and the Ministry of Education and Science of Ukraine to solve the problem of increasing the energy efficiency of a research complex and creating an energy efficient power supply system that will ensure the sustainability of scientific equipment for research programs of the National Academy of Sciences of Ukraine. The system of power supply of the complex and modes of power consumption of the complex are described. The devices of the radar system are described, as well as the most powerful consumers of electricity, which consume electricity for experimental and economic needs. The energy consumption of the incoherent scattering complex in 2013 is analyzed. Graphs of the average power consumption (daily average) and average power consumption in measurement modes were obtained and presented. The feasibility of work to optimize the energy supply of the research complex of the institute of the ionosphere is described. Possible measures are proposed to reduce the economic cost of conducting experiments on the study of the ionosphere of an incoherent scattering research complex. The analysis of the works of modern authors is carried out in order to show that increasing the efficiency of the power supply systems is an actual problem of modern research.

Keywords: ionosphere, incoherent scatter radar, measurement modes, power supply system, power consumption, energy efficiency, average power consumption.

Вступ. Головними завданнями проектування і експлуатації сучасних систем електропостачання є правильне визначення електричних навантажень, раціональна передача та розподіл електроенергії, забезпечення необхідного ступеня надійності електропостачання, забезпечення необхідної якості електроенергії на затискачах електроприймачів, забезпечення електромагнітної сумісності приймачів

електричної енергії з мережею живлення, економія електроенергії та інших матеріальних ресурсів.

Вивчення режимів роботи електроустановок великої потужності з урахуванням вимог до якості електроенергії та надійності електропостачання є необхідністю для формування систем електропостачання об'єкту в цілому. Одними з важливих питань режиму систем електропостачання є споживання і регулювання активної потужності

© С. С. Козлов, 2018

об'єктами та електроустановками великої потужності, раціональне регулювання добового графіка активного навантаження і обмеження споживаної потужності в аварійних умовах при зниженні якості електроенергії в енергосистемі.

Компенсація реактивної потужності в промислових електричних мережах, особливо з урахуванням електромагнітної сумісності приймачів електричної енергії з мережею живлення, є так само одним з найбільш дискусійних питань в електропостачанні [1].

Комбіноване використання традиційних джерел енергії з різними екологічно чистими альтернативними джерелами енергії дозволяє покрити потреби в електроенергії та підвищити рівень надійності електропостачання, підвищити енергоефективність та знизити економічну вартість проведення експериментів.

Інститут іоносфери є великим світовим науковим центром з унікальним інструментом для дослідження навколосемного космічного простору і сонячно-земних зв'язків. Науково-дослідний комплекс Інституту є об'єктом Національного надбання України. З кожним роком, в зв'язку зі зростанням вартості електроенергії, проведення експериментів становиться дорожчим. Тому підвищення ефективності функціонування системи електропостачання Інституту іоносфери є актуальною проблемою на даний час.

Метою даної статті є графічне відображення результатів обробки даних, отриманих під час вимірювань добового активного навантаження системи енергоспоживання Інституту іоносфери та активного навантаження системи енергоспоживання у режимі проведення вимірювань, а також аналіз сучасних методів для підвищення ефективності функціонування систем електропостачання.

Опис системи енергоспоживання Інституту іоносфери. Експериментальний комплекс Інституту є великим енергоспоживачем. Середня споживана потужність радіопередавального пристрою радара некогерентного розсіяння складає близько 100 кВт, а імпульсна 2 МВт [2]. Нагрівний стенд декаметрового діапазону споживає 200 кВт. Крім пристроїв радарної системи на полігоні знаходяться десятки потужних споживачів, які витрачають електроенергію на експериментальні та господарські потреби. Серед таких пристроїв можна виділити багатоконтурну водяну систему охолодження передавача близько 30 кВт, дистиллятори 500 кВт, електрокотли 18 кВт і ін. З огляду на специфіку комплексу, об'єкт живиться від багатопотокової високовольтної трифазної системою електроживлення 10 кВ. Після більш десятка понижуючих трансформаторів 1000 кВА, 560 кВА, 250 кВА електроживлення розходить по споживачах. При цьому частина обладнання живиться від змінної гармонійної напруги частотою 50 Гц і 400 Гц, а частина постійними напругами +125 В, +/-60 В, +/-27 В, +/-15 В, +/-12 В та ін. Напруга частотою 400 Гц забезпечується двома перетворювачами трифазного струму ПСЧ-30к і одним перетворювачами трифазного струму ПСЧ-50к. Значення ККД таких перетворювачів за технічними паспортами 75% та 80% відповідно.

На рис. 1 приведено енергоспоживання експериментального комплексу за перше півріччя 2013 р. На цьому прикладі видно, що енергоспоживання радіополігону нерівномірно. У режимі вимірювань енерговитрати в десятки разів перевищують середньодобові показники, що вимагають додаткового енергетичного потенціалу енергогенеруючих установок.

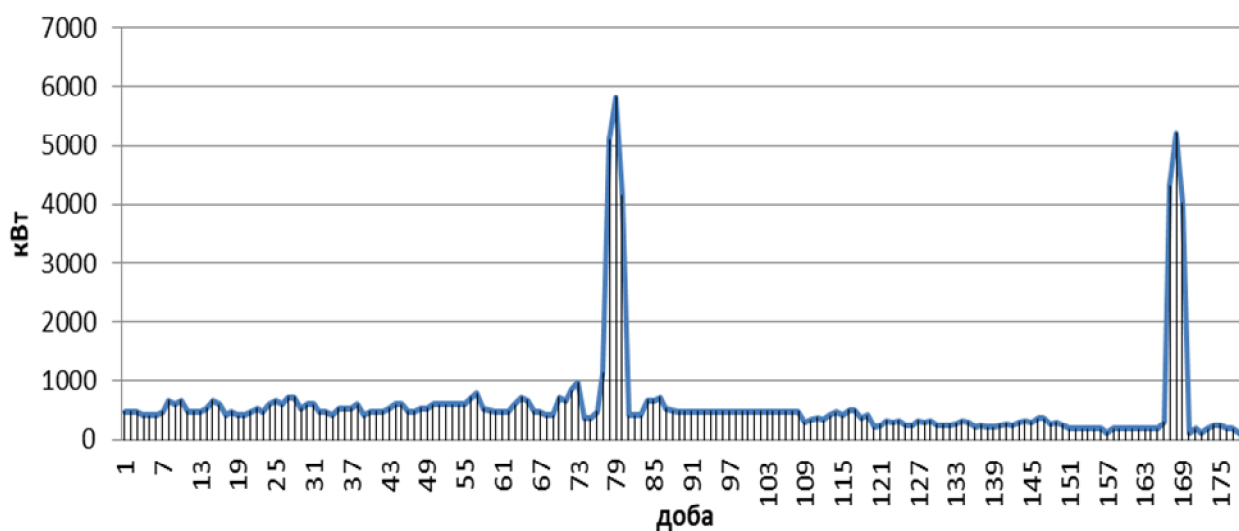


Рис. 1. Енергоспоживання експериментального комплексу за перше півріччя 2013 р.

Опис режимів енергоспоживання Інституту та результати обробки даних.

На рис. 2 та рис. 3 приведені графіки енергоспоживання радіополігону Інституту іоносфери у зимовій та літній періоди.

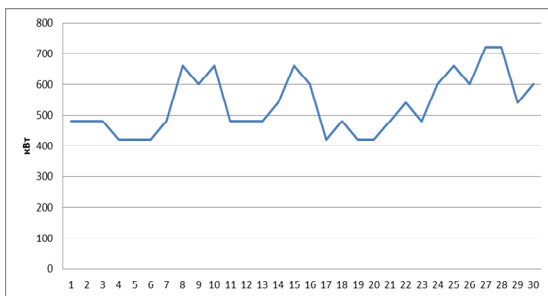


Рис. 2. Споживання у зимовий період

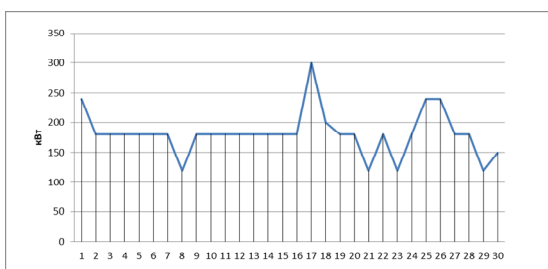


Рис. 3. Споживання у літній період

Середнє значення при відсутності вимірювань досягають 530 кВт та 200 кВт на добу відповідно. Під час проходження експерименту енергоспоживання досягає 5 МВт на добу. Більшість потужних споживачі мають різні режими роботи та як наслідок різний розподіл енергоспоживання на протязі доби та пори року.

Проблема підвищення енергоефективності науково-дослідного комплексу Інституту іоносфери привела до необхідності створення гібридної енергетичної системи, що забезпечує стійку роботу наукового обладнання для виконання дослідницьких програм [3]. Інтервал часу доби з максимальним навантаженням енергосистеми характеризується високим енергетичним потенціалом сонячних і вітрогенеруючих установок, що дозволяє, з деякими обмеженнями відмовитися від споживання електроенергії з промислової сеті в денний час.

Аналіз літератури, щодо підвищення ефективності функціонування систем електропостачання. У рішенні проблеми підвищення ефективності функціонування систем електропостачання, а також поліпшення якості електроенергії можна виділити три напрямки:

1. Рационалізація засобів електропостачання. Сюди відносяться: підвищення потужності мережі; живлення споживачів, що володіють нелінійними вольт-амперними характеристиками, підвищеною напругою; комбіноване використання традиційних джерел енергії з альтернативними джерелами енергії.

2. Удосконалювання самих споживачів: номінальне завантаження двигунів, використання багатофазних схем випрямлення, заміна діодів (або тиристорів) випрямляча цілком керованими приладами (транзисторами або тиристорами, що замикаються, і перехід до активного керування потоком енергії) і ін.

3. Використання пристроїв корекції якості електроенергії, або регуляторів одного або декількох показників якості електроенергії, або зв'язаних з ними параметрів споживаної потужності.

Цим питанням присвячена велика кількість наукових праць, що знайшли відображення в численних публікаціях фахівців у цій області.

Опубліковано низку наукових робіт, присвячених вирішенню завдань поліпшення якості електроенергії мережі живлення, наприклад [4 – 6], в яких сформульовані основні принципи і підходи до вирішення проблеми якості електроенергії мережі живлення а так само запропоновані різні варіанти побудови пристроїв компенсації неактивної потужності живильної мережі.

Проблеми та перспективи розвитку альтернативної енергетики досліджуються у наукових працях С. Войтка [7], О. Дячука [8, 9], Б. Серебреннікова [10], С. Нараєвського [11], С. О. Кудрі [12], Ю. П. Морозова, В. Ф. Резцова, П. Ф. Васько, Г. М. Забарного, В. П. Ключа, А. Р. Щокіна та ін.

У той же час аналіз наукових праць свідчить, що низка проблемних питань потребує подальшого вивчення, виникає потреба в поліпшення існуючих науково-методичних підходів до визначення результативності функціонування різних видів заходів альтернативної енергетики з метою розробки рекомендацій щодо їх удосконалення.

Висновки. Аналіз робіт сучасних авторів показав, що підвищення ефективності функціонування систем електропостачання є актуальною проблемою сучасних досліджень. Аналіз режимів енергоспоживання комплексу некогерентного розсіяння Інституту іоносфери НАН і МОН України показав необхідність вирішення проблеми підвищення енергоефективності науково-дослідного комплексу та створення енергоефективної системи електропостачання, яка забезпечить стійку роботу наукового обладнання для виконання дослідницьких програм. Для зниження економічної вартості проведення експериментів з дослідження іоносфери науково-дослідного комплексу некогерентного розсіяння запропоновано комбіноване використання традиційних джерел енергії з альтернативними джерелами енергії.

Мета подальших досліджень, щодо створення енергоефективної системи електропостачання науково-дослідного комплексу Інституту іоносфери, полягає в аналізі методичних підходів до обґрунтування вибору джерела електропостачання та у розвитку теоретичних концепцій і методичних

рекомендацій, щодо наукового обґрунтування практичних розробок впровадження відновлюваних джерел енергії.

Список літератури

1. Иванов В.С. Режимы потребления и качество электроэнергии систем электроснабжения промышленных предприятий / В.С. Иванов, В.И. Соколов. - М.: Энергоатомиздат, 1987. - 336 с.: ил. (Экономия топлива и электроэнергии)
2. С.С. Козлов, Оптимізація енергопостачання науково-дослідного комплексу інституту іоносфери // Матеріали I Міжнародної науково-технічної конференції «Актуальні проблеми автоматики та приладобудування» 2017 – С. 226-227
3. С.С. Козлов, Математическое моделирование системы электроснабжения научно-исследовательского комплекса Института ионосферы // XXVI міжнародна науково-практична конференція MicroCad-2018. Секція №15. ч.3 С.310
4. Левон О. О. Напівпровідниковий двоканальний регульований компенсатор неактивних складових повної потужності: дис... канд. техн. наук: 05.09.12 / Левон Олена Олександрівна. – Х., 2015. – 200 с.
5. Asiminoaei L., Lascu C., Blaabjerg F., Boldea I. Performance Improvement of Shunt Active Power Filter With Dual Parallel Topology. *IEEE Transactions on Power Electronics*. Vol. 22. No. 1. 2007. Pp. 247-259.
6. Dixon J., del Valle Y., Orchard M., Ortúzar M., L. Morán L. Maffrand C. A Full Compensating System for General Loads, Based on a Combination of Thyristor Binary Compensator and a PWM-IGBT Active Power Filter. *IEEE Trans. Industrial Electronics*. Vol. 50. No. 5. 2003. Pp. 982-989.
7. Трофименко О. О., Войтко С. В. Функціонування, стратегічний розвиток і регулювання відновлюваної енергетики : монографія / О. О. Трофименко, С. В. Войтко. – К. : Альфа Реклама, 2014. – 178 с.
8. Дячук О. А. Внесок України до нової Глобальної кліматичної угоди / О. А. Дячук // *Економіка і прогнозування*. - 2016. - № 1. - С. 129-141.
9. Дячук О. А. Політика енергоефективності в Україні / О. А. Дячук, Р. З. Подолець, Б. С. Серебренніков, М. Г. Чепелев // *Економіка України*. - 2015. - № 4. - С. 58-69.
10. Нараєвський С. В. Конкурентоспроможність альтернативних технологій отримання енергії : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. ек. наук : спец. 08.00.04 "економіка та управління підприємствами" / Нараєвський С. В. – Київ, 2015. – 24 с.
11. Кудря С. О. Стан та перспективи розвитку відновлюваної енергетики в Україні / С. О. Кудря // *Вісник Національної академії наук України*. - 2015. - № 12. - С. 19-26.
12. Кудря С. О. Атлас енергетичного потенціалу відновлюваних джерел енергії України / С. О. Кудря, В.Ф. Резцов, Т.В. Суржик, Л.В. Яценко, Г.П. Душина, П.Ф. Васько, Ю.П. Морозов, Г.М. Забарний та інші // *Інститут відновлюваної енергетики НАН України*. - 2012. – 60 с.
13. Стратегія розвитку екологічної політики України на період до 2020 року // *Міністерство екології та природних ресурсів України*. URL: <http://old.menr.gov.ua/about/strategy>.
14. Дев'яткіна С. С. Альтернативні джерела енергії : навч. посіб. /С. С. Дев'яткіна, Т. Ю. Шкварницька. – К. : НАУ, 2006. – 92 с.

References (transliterated)

1. Ivanov V.S. Consumption modes and power quality of power supply systems of industrial enterprises / V.S. Ivanov, V.I. Sokolov. - M.: Energoatomizdat, 1987. - 336 Pp.
2. S.S. Kozlov, Optimization of power supply of the research complex of the Institute of the ionosphere // Materials of the 1st International Scientific and Technical Conference "Actual problems of automation and instrumentation" 2017 - P. 226-227
3. S.S. Kozlov, Mathematical modeling of the power supply system of the research complex of the Institute of ionosphere // XXVI International Scientific and Practical Conference MicroCad-2018. Section №15. Part 3 of P.310
4. Levon O. O. Semiconductor dual two-channel regulated compensator of inactive components of the total power: Ph.Dr. tech. sci. diss.: 05.09.12 / NTU "KhPI". Kharkiv. 2015. 200 Pp. (Rus.)
5. Asiminoaei L., Lascu C., Blaabjerg F., Boldea I. Performance Improvement of Shunt Active Power Filter With Dual Parallel Topology. *IEEE Transactions on Power Electronics*. Vol. 22. No. 1. 2007. Pp. 247-259.
6. Dixon J., del Valle Y., Orchard M., Ortúzar M., L. Morán L. Maffrand C. A Full Compensating System for General Loads, Based on a Combination of Thyristor Binary Compensator and a PWM-IGBT Active Power Filter. *IEEE Trans. Industrial Electronics*. Vol. 50. No. 5. 2003. Pp. 982-989.
7. Trofimenko O. O. Functioning, strategic development and regulation of renewable energy: monograph / O. O. Trofimenko, C. B. Voitko. – C. : Alfa Reklama, 2014. – 178 Pp.
8. Dyachuk O. A. Contribution of Ukraine to the new Global Climate Agreement / O. A. Dyachuk // *Economics and Forecasting*. - 2016. - № 1. - P. 129-141.
9. Dyachuk O. A. Energy Efficiency Policy in Ukraine / O. A. Dyachuk, R. Z. Podolec, B. S. Serebrennikov, M. G. Chepelev // *Ukraine economy*. – 2015. – № 4. – P. 58-69.
10. Naraevskiy S. V. Competitiveness of alternative technologies of energy obtaining: author's abstract. dis for obtaining sciences. Degree Candidate eq Sciences: special 08.00.04 "Economics and Management of Enterprises" / S. V. Naraevskiy – Kiev, 2015. – 24 Pp.
11. Kudrya S. O. Status and Prospects for Renewable Energy in Ukraine / S. O. Kudrya // *Bulletin of the National Academy of Sciences of Ukraine*. - 2015. - № 12. - P. 19-26.
12. Kudrya S. O. Atlas of energy potential of renewable energy sources in Ukraine / S. O. Kudrya, V.F. Rezcov, T.V. Surghik, L.V. Yacenco, G.P. Dushina, P.F. Vasko, Y.P. Morozov, G.M. Zabarnui and others // Renewable Energy Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine. – 2012. – 60 Pp.
13. Strategy of development of ecological policy of Ukraine for the period till 2020 // *Ministry of Ecology and Natural Resources of Ukraine*. URL: <http://old.menr.gov.ua/about/strategy>.
14. Devyatkina S. S. Alternative sources of energy: teach. manual. /S. S. Devyatkina, T. Y. Shkvarnitska. – K. : NAU, 2006. – 92 Pp.

Поступила (received) 07.12.2018

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Козлов Сергій Сергійович (Kozlov Sergey Sergeevich, Kozlov Serhii Sergeevich) – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», старший викладач кафедри радіоелектроніки; м. Харків, України; ORCID: 0000-0001-9638-5897; e-mail: ksser300@gmail.com

ЗМІСТ

Брезгунов А.В., Брезгунов С.А. Вычисление амплитуд радиоимпульсов по результатам их перемножения на опорные сигналы.....	3
Брезгунов А.В., Брезгунов С.А. Приём радиосигналов с фазовой компенсацией помех.....	9
Пуляев В.О., Емельянов Л.Я., Рогожкін Є.В. Підвищення точності розрахунку ординат АКФ сигналу розсіяння	13
Шульга М.А., Котов Д.В., Богомаз А.В. Исследование реакции концентрации электронов в максимуме слоя F2 ионосферы на слабую геомагнитную бурю 24 декабря 2017 г. в разных широтах европейского региона.....	18
Богомаз А.В., Котов Д.В., Искра Д.А. Результаты проверки нового программно-аппаратного комплекса для обработки данных радара некогерентного рассеяния в режиме исследования средней ионосферы	24
Емельянов Л.Я., Мирошников А.Е., Колодяжний В.В. Разработка подсистемы приема сигнала некогерентного рассеяния, его записи и обработки на промежуточной частоте.....	33
Гринченко С.В. Расчёт моментов времени восхода и захода Солнца путём задания данных четырёхлетнего цикла изменений солнечного склонения и местного времени верхней кульминации	43
Козлов С.С. Анализ режимов энергопотребления комплекса некогерентного рассеяния Института ионосферы НАН и МОН Украины	51

CONTENT

Brezgunov O.V., Brezgunov S.O. Calculation of amplitudes of radio pulses on results their multiplying on supporting signals	3
Brezgunov O.V., Brezgunov S.O. Receiving of the radio signals with phase compensation of hindrances.....	9
Pulyayev V.A., Emelyanov L.Ya., Rogozhkin E.V. Improving the accuracy of calculation of the scatter signal ACF ordinates	13
Shulha M.O., Kotov D.V., Bogomaz O.V. Investigation of the ionospheric F2-layer electron density peak reaction to weak geomagnetic storm of December 24, 2017 for different latitudes of the European region	18
Bogomaz O.V., Kotov D.V., Iskra D.O. Results of testing new hardware and software system for processing data obtained by incoherent scatter radar operating in the mode for middle ionosphere research.....	24
Emelyanov L.Ya., Miroshnikov A.E., Kolodiazhnyi V.V. Development of subsystem for reception of incoherent scatter signal, its recording and processing at the intermediate frequency	33
Grinchenko S.V. Calculation of the rising and setting times of the Sun by setting the data of the four-year cycle of solar declination and local time of the upper culmination	43
Kozlov S.S. Analysis of the modes of energy consumption of the complex of an incoherent scattering of the Institute of ionosphere of National Academy of Sciences and the Ministry of Education and Science of Ukraine.....	51

НАУКОВЕ ВИДАННЯ

**ВІСНИК
НАЦІОНАЛЬНОГО ТЕХНІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ
«ХПІ»**

Збірник наукових праць

Серія:
Радіофізика та іоносфера

№ 43 (1319) 2018

Науковий редактор: д.т.н., проф. Пуляєв В.О.

Відповідальний секретар та технічний редактор: к.ф.-м.н., с.н.с. Ляшенко М.В.

Відповідальний за випуск к.т.н., доц. Шайда В.П.

АДРЕСА РЕДКОЛЕГІЇ: 61001, м. Харків, Д-МСП, вул. Кирпичова, 16
Інститут іоносфери НАН та МОН України
тел. +38 (057) 707-65-27; *e-mail*: iion@kpi.kharkov.ua

Обл.-вид. № 27-18.

Підписано до друку 22.12.2018 р. Формат 60×84 1/8.
Папір офсетний. Друк – ризографія. Гарнітура Times New Roman.
Умовн. друк. арк. 3,18. Наклад 300 прим. Зам. № 2018. Ціна договірна

Видавничий центр НТУ «ХПІ». Свідоцтво про державну реєстрацію
суб'єкта видавничої справи ДК № 3657 від 24.12.2009 р.
61002, м. Харків, вул. Кирпичова, 21

Надруковано у ТОВ «ПЛАНЕТА-ПРИНТ»
Свідоцтво № 24800170000040432 від 21.03.2001 р.
61002, м. Харків, вул. Багалия, 16