

## ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

УДК 621.3.092.4

### ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ НА МЕСТНОСТИ НИЗКОДИНАМИЧНЫХ ПОДВИЖНЫХ ОБЪЕКТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА ИОНОСФЕРЫ

*Статья поступила в редакцию 25.05.2017, в окончательном варианте – 17.06.2017.*

**Катков Евгений Константинович**, Северо-Кавказский федеральный университет, 355047, Российская Федерация, г. Ставрополь, ул. Пушкина, 1, аспирант, ORCID <http://orcid.org/0000-0002-6748-0032>, e-mail: [kep26rus@mail.ru](mailto:kep26rus@mail.ru), [https://elibrary.ru/author\\_profile.asp?authorid=874344](https://elibrary.ru/author_profile.asp?authorid=874344)

Рассмотрены вопросы снижения погрешности позиционирования на местности подвижных объектов, использующих информацию со спутниковых радионавигационных систем (СРНС) при возникновении искусственных ионосферных образований (ИИО). Показано, что в этом случае для повышения точности позиционирования целесообразно использование стационарной информационной системы мониторинга ионосферы (ИСМИ). Принимая навигационные сигналы от всех видимых навигационных космических аппаратов, данная система проводит измерения, на основании которых может быть сделан вывод о наличии в видимой части небесной полусферы ИИО. Предлагается набор измерений, которые должны быть проведены ИСМИ для определения характеристик областей повышенной ионизации в ионосфере и их координат. На основании полученных результатов мониторинга ионосферы предлагается методика расчета погрешностей определения псевдодальностей до тех навигационных космических аппаратов, сигнал которых проходит через ИИО и подвергается искажениям вплоть до частотно-селективных замираний сигнала. Эти поправки предлагается выдавать потребителям СРНС, являющихся пользователями ИС мониторинга ионосферы. Учет этих поправок может существенно улучшить точность позиционирования объектов. Предлагаемая методика не требует серьезного усложнения навигационной аппаратуры потребителей, кроме обеспечения связи с ИСМИ.

**Ключевые слова:** спутниковые радионавигационные системы, размер ионосферных неоднородностей, искусственные возмущения ионосферы, погрешность определения псевдодальности, информационная система мониторинга ионосферы, погрешность позиционирования, полоса когерентности канала связи, степень частотно-селективных замираний

### INCREASING POSITIONING ACCURACY IN THE AREA FOR LOW DYNAMIC MOBILE OBJECTS USING INFORMATION FROM THE IONOSPHERE MONITORING SYSTEM

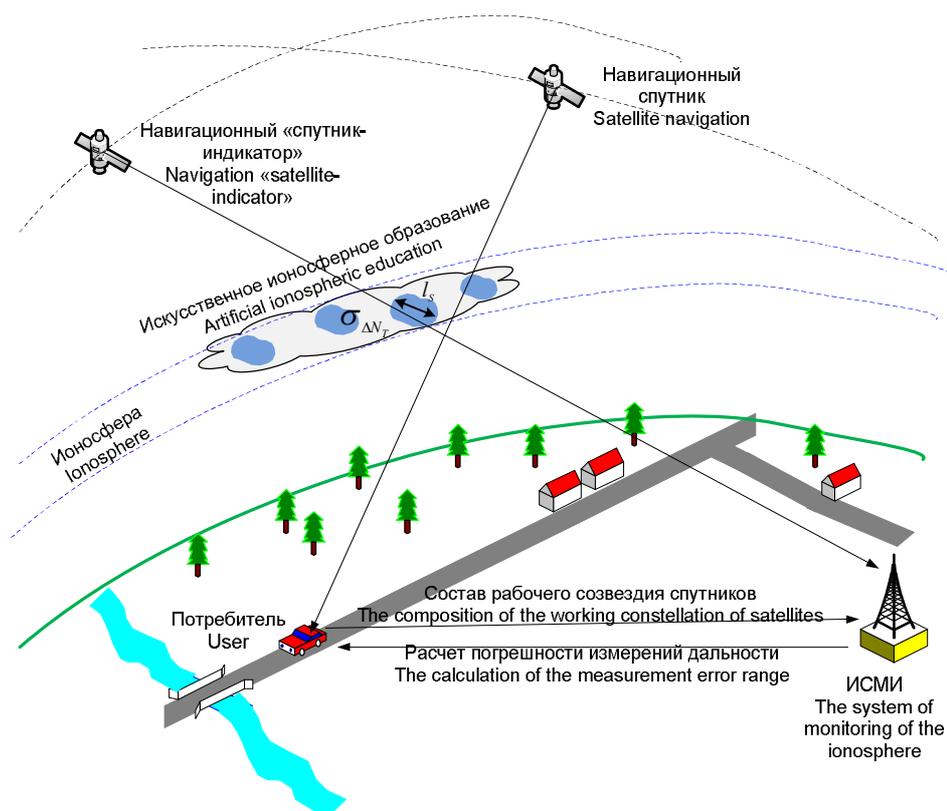
*The article has been received by editorial board 25.05.2017, in the final version – 17.06.2017.*

**Katkov Yevgeniy K.**, North-Caucasian Federal University, 1 Pushkin St., Stavropol, 355047, Russian Federation, post-graduate student, ORCID <http://orcid.org/0000-0002-6748-0032>, e-mail: [kep26rus@mail.ru](mailto:kep26rus@mail.ru), [https://elibrary.ru/author\\_profile.asp?authorid=874344](https://elibrary.ru/author_profile.asp?authorid=874344)

The problems of reducing the error in positioning mobile objects using information from satellite radio navigation systems (SRNS) in the event of artificial ionospheric formations (AIFs) are considered in the paper. It is shown, that in this case, to improve positioning accuracy, it is advisable to use a stationary information ionosphere monitoring system (IIMS). This system, receiving navigation signals from all visible navigation space vehicles, takes measurements, based on which a conclusion about presence of AIFs in the visible part of the celestial hemisphere, can be made. The set of measurements to be taken by stationary IIMS for determine the characteristics of high ionization areas of the ionosphere, as well as their coordinates, is proposed. Basing on the results of monitoring ionosphere, we propose a methodology of estimating errors in determining pseudorange to those navigation space vehicles, whose signals passes through the AIFs and undergoes distortions up to frequency selective fade of the signal. These corrections are proposed to be handed out to consumers of SRNS, who are users of the IIMS. Taking into consideration these corrections can significantly improve the accuracy of objects positioning. The proposed methodology does not require a serious complication of the consumers navigation equipment, except providing communication with the IIMS.

**Keywords:** satellite radionavigation system, the size of the ionospheric irregularities, disturbances of the ionosphere, error in determining pseudorange, information ionosphere monitoring system; positioning error, strip of the communication channel coherence, degree of frequency selective fade

## Graphical annotation (Графическая аннотация)



В настоящее время во многих сферах человеческой деятельности широко используются среднеорбитальные спутниковые радионавигационные системы (СРНС): российская ГЛОНАСС, американская GPS, китайская Бэйдоу, европейская Galileo. Полный состав орбитальной группировки ГЛОНАСС и GPS составляет 24 навигационных космических аппарата (НКА). С учетом необходимости резервирования этот состав поддерживается на уровне 30 НКА. Декларированная эксплуатантами таких систем точность позиционирования объектов на местности составляет менее 10 м. Для повышения точности используются различные меры, в т.ч. переход на водородные часы в НКА, увеличение числа НКА в рабочем созвездии до 7–8 вместо 4-х. Однако повышение точности позиционирования может быть достигнуто и в наземном сегменте СРНС. Особенно это актуально в случае возникновения высоких погрешностей определения псевдодальностей, связанных с возмущениями, вносимыми ионосферой на трассе распространения навигационного радиосигнала (НРС).

Известно [1, 8, 12, 14, 17–19], что при возникновении на трассе распространения НРС искусственных ионосферных образований (ИИО) погрешность определения псевдодальностей в СРНС существенно возрастает. В работах [5, 6, 11–14] показано, что в результате воздействия мощного коротковолнового излучения на ионосферу происходит её радионагрев, а это в свою очередь приводит к возникновению ИИО в локальной области. Такие области повышенной ионизации (ОПИ) характеризуются наличием в них неоднородностей электронной концентрации (ЭК), которые выстраиваются вдоль геомагнитных линий. Поперечный размер неоднородностей варьируется в широком диапазоне от 0,1 м до нескольких сотен километров. В результате возникновения ИИО возрастают дифракционные свойства ионосферы, что в свою очередь приводит к возникновению замираний сигналов. В случае передачи широкополосных сигналов СРНС замирания могут носить частотно-селективный характер. Это связано с сужением полосы когерентности ( $\Delta F_k$ ) трансionoсферного канала связи.

Локальный характер ИИО приводит к возрастанию неравноточности измерений псевдодальностей. Известно [8], что многократное возрастание погрешности измерения псевдодальности даже в одной радиолнии приводит к погрешности местоопределения, не отвечающей требованиям точности в СРНС. В работе [3] было предложено создать информационную систему мониторинга ионосферы (ИСМИ), которая по сигналам всех видимых НКА смогла бы определить наличие ОПИ в видимой небесной полусфере, ее координат и параметров. Это позволит снизить возможные ошибки определения положений низкодинамичных наземных объектов, использующих данную ИСМИ.

Целью данной статьи является разработка методики определения погрешности измерения псевдодалности с помощью ИСМИ и снижение погрешности определения положений мобильных объектов, являющихся потребителями СРНС за счет учета поправок к измерениям, которые рассчитываются данной системой.

**Постановка задачи.** Пусть в ионосфере возникает локальная ОПИ, проходя через которую НРС подвергается искажениям вплоть до возникновения частотно-селективных замираний (ЧСЗ). Требуется оценить наличие в ионосфере ОПИ; определить погрешности определения псевдодалности в тех радиолниях, которые будут использоваться потребителем в сеансе позиционирования. Необходимо выдать потребителю поправки к измерениям псевдодалностей и, таким образом, повысить точность решения навигационной задачи. При этом предполагается, что такая задача решается потребителем информации в автоматизированном режиме, на основе использования соответствующих аппаратно-программных средств.

**Ошибка измерения псевдодалности.** Известно [15, 16], что ошибка позиционирования зависит в основном от ошибки определения псевдодалности до каждого из НКА рабочего созвездия, а также геометрического фактора GDOP. Он характеризует рабочее созвездие НКА, используемое потребителем в конкретном сеансе позиционирования. Оптимальным называется созвездие, при котором один НКА находится в зените потребителя, а три остальных равномерно, через  $120^\circ$ , распределены в пригоризонтной области. В этом случае GDOP является минимальным и составляет 1,8.

В случае если хотя бы один НРС попадает в ИИО и подвергается ЧСЗ, то погрешность позиционирования многократно возрастает [8]. С увеличением числа таких НРС погрешность позиционирования потребителя ( $\Delta q = [\Delta X, \Delta Y, \Delta Z, \tau]$ ) еще больше увеличивается и выходит за пределы допустимых для навигационной системы значений. В свою очередь ошибка определения псевдодалности до НКА ( $\sigma_D$ ) прямо пропорциональна ошибке слежения за временем прихода радиосигнала ( $\sigma_\tau$ ) определяется выражением

$$\sigma_D = c \cdot \sigma_\tau, \quad (1)$$

где  $c$  – скорость распространения радиоволн.

В работе [3] показано, что в условиях сильных ионосферных сцинтилляций ошибка слежения за временем прихода сигнала будет представлять из себя сумму ошибки временных флуктуаций сигнала ( $\sigma_{\tau S}$ ) и ошибки определения времени прихода максимума сигнала ( $\sigma_{\tau H}$ ):

$$\sigma_\tau = \sigma_{\tau S} + \sigma_{\tau H}, \quad (2)$$

При этом величина ошибки временных флуктуаций сигнала ( $\sigma_{\tau S}$ ) будет в основном зависеть от среднего квадратичного отклонения (СКО) флуктуации фазы сигнала ( $\sigma_{\varphi S}$ ), возникающего при прохождении НРС через ИИО ( $\sigma_{\tau S} = f(\sigma_{\varphi S})$ ). Ошибка определения времени сигнала ( $\sigma_{\tau H}$ ) будет определяться шириной полосы когерентности ( $\Delta F_k$ ) трансionoсферного канала связи ( $\sigma_{\tau H} = f(\Delta F_k)$ ) [3, 9, 16].

Согласно [14, 18] из-за фазовых флуктуаций ( $\sigma_{\varphi S}$ ) будет возникать временная флуктуация сигнала ( $\sigma_{\tau S} \neq 0$ ), определяемая выражением

$$\sigma_{\tau S} = \frac{\sigma_{\varphi S}}{2\pi f_0}, \quad (3)$$

где  $f_0$  – несущая частота навигационного радиосигнала.

Величина СКО флуктуации фазового фронта волны на выходе из ионосферы ( $\sigma_{\varphi S}$ ) согласно [3, 4] определяется выражением

$$\sigma_{\varphi S} = \frac{80,8\pi}{cf_0} \sigma_{\Delta N_T}, \quad (4)$$

где 80.8 – коэффициент с размерностью [ $\text{м}^3/\text{с}^2$ ];  $\sigma_{\Delta N_T}$  – СКО интегральной ЭК в ионосфере в наклонной радиолнии [ $\text{эл}/\text{м}^2$ ].

Величина  $\sigma_{\Delta N_T}$ , согласно [1, 3] определяется выражением:

$$\sigma_{\Delta N_T} = \sigma_{\Delta N} \sqrt{L_0 h_3 \sec \Theta} \frac{\Gamma(p/2 - 1/2)}{\sqrt{\pi} \Gamma(p/2 - 1)}, \quad (5)$$

где  $\sigma_{\Delta N}$  – СКО флуктуаций ЭК в неоднородностях ионосферы [ $\text{эл}/\text{м}^3$ ];  $L_0$  – максимальный размер ионосферных неоднородностей;  $h_3$  – эквивалентная толщина ионосферы (500 км);  $\Theta$  – зенитный угол НКА;  $p$  – фазовый спектральный индекс.

Использование выражения (5) для определения величины  $\sigma_{\Delta N_T}$  достаточно затруднительно, так как заранее неизвестны значения фазового спектрального индекса  $p$ , величины  $L_0$ , а значения  $h_3$  берется приблизительно. В то же время существуют технические средства, позволяющие провести ряд изме-

рений, устраняющих эту неопределенность. Так, аппаратура “NovAtel GPS-6”, установленная в Северо-Кавказском федеральном университете, позволяет измерить значение СКО интегральной ЭК в наклонной радиолинии ( $\sigma_{\Delta N_T}$ ) непосредственно на трассе распространения сигнала. Также известно устройство обнаружения ИИО с мелкомасштабными неоднородностями [10], позволяющее определять величину  $\sigma_{\Delta N_T}$ . Эти измерения позволяют, используя выражение (4) и (3), получить значение временной флуктуации сигнала ( $\sigma_{\tau_S}$ ).

Для оценки ошибки определения времени прихода максимума сигнала ( $\sigma_{\tau_H}$ ) при возникающих ЧСЗ принимаемого НРС воспользуемся выражением, полученным в [8, 9]

$$\sigma_{\tau_H} = \frac{1}{\sqrt{2\pi h^2 \Delta F_0}} \sqrt{\left(1 + \frac{4\Delta F_0^2}{\pi \Delta F_k^2}\right)^2 + h^2 \left(1 + \frac{4\Delta F_0^2}{\pi \Delta F_k^2}\right)^{3/2}}, \quad (6)$$

где  $\Delta F_0$  – ширина спектра НРС;  $h^2$  – отношение энергии принимаемого НРС к спектральной плотности мощности шума;  $\Delta F_k$  – полоса когерентности транссионсферного канала связи определяемая как

$$\Delta F_k = \frac{2f_0}{\sigma_{\text{os}} \sqrt{2(1 + d_1^2/2)}}, \quad (7)$$

где

$$d_1^2 = \frac{(3z^2 - 3zh_3 + h_3^2)c^2 \sec^2 \Theta}{192\pi^2 f_0^2 l_S^4}, \quad (8)$$

где  $z$  – расстояние от верхней границы ионосферы до точки приема при вертикальном распространении радиоволн (600 км);  $l_S$  – характерный размер ионосферных неоднородностей.

Входящая в (6) величина  $\Delta F_k$  подлежит определению. Известно устройство определения степени ЧСЗ навигационных радиосигналов СРНС [13]. Оно позволяет определять значение полосы когерентности ( $\Delta F_k$ ) при возникновении ИИО. Принцип действия этого устройства состоит в делении широкополосного НРС на спектральные составляющие и проверке условия их коррелированности между собой. Корреляционная функция НРС имеет вид [8, 13]

$$K(\Delta F_0) = e^{-(\Delta F_0/\Delta F_k)^2}. \quad (9)$$

При выполнении условия возникновения ЧСЗ  $\Delta F_0/\Delta F_k = 1$  коэффициент корреляции становится равным  $K(\Delta F_0) = e^{-1} \approx 0,37$ . Если значение  $K(\Delta F_0) > 0,37$  на всем интервале  $\Delta F_0$ , то условие возникновения ЧСЗ для такого НРС не выполняется. Разнос частот, при котором достигается значение  $K(\Delta F_0) = 0,37$ , определяет ширину полосы когерентности канала связи  $\Delta F_k$ .

В выражении (8) имеется неопределенность, связанная с неизвестной величиной характерного размера ионосферных неоднородностей ( $l_S$ ). Устранить эту неопределенность также помогут измерения величин  $\sigma_{\Delta N_T}$  и  $\Delta F_k$ . Выразим из уравнения (7) с учетом (4) величину  $d_1^2$

$$d_1^2 = \frac{4c^2 f_0^4}{80,8^2 \Delta F_k^2 \pi^2 \sigma_{\Delta N_T}^2} - 2. \quad (10)$$

Приравняв правые части выражений (8) и (10), и выразив из полученного выражения  $l_S$ , получим выражение для характерного размера ионосферных неоднородностей:

$$l_S = \left( \frac{80,8^2 (3z^2 - 3zh_3 + h_3^2) c^2 \sec^2 \Theta \cdot \Delta F_k^2 \sigma_{\Delta N_T}^2}{768c^2 f_0^6 - 384 \cdot 80,8^2 \pi^2 f_0^2 \Delta F_k^2 \sigma_{\Delta N_T}^2} \right)^{1/4} \quad (11)$$

Таким образом, выражение (11) позволяет, имея измерения  $\sigma_{\Delta N_T}$  и  $\Delta F_k$ , получить значение характерного размера ионосферных неоднородностей ( $l_S$ ) при возникновении ИИО.

С учетом (2–4) и (6) выражение (1) для определения погрешности измерения псевдодальности ( $\sigma_D^{\text{ИИО}}$ ) при возникновении ИИО и прохождении НРС через ОПИ примет вид

$$\sigma_D^{\text{ИИО}} = c \left( \frac{40,4}{c f_0^2} \sigma_{\Delta N_T} + \frac{1}{\sqrt{2\pi h^2 \Delta F_0}} \sqrt{\left(1 + \frac{4\Delta F_0^2}{\pi \Delta F_k^2}\right)^2 + h^2 \left(1 + \frac{4\Delta F_0^2}{\pi \Delta F_k^2}\right)^{3/2}} \right). \quad (12)$$

Таким образом, имея информацию о возникновении ионосферных возмущений и проведя измерения величин  $\sigma_{\Delta N_T}$  и  $\Delta F_k$ , можно определить погрешность измерения псевдодальностей при появлении ИИО ( $\sigma_D^{\text{ИИО}}$ ).

**Обоснование целесообразности применения информационной системы мониторинга ионосферы.** Массовая навигационная аппаратура потребителей (НАП) СРНС не обладает возможностями измерений величин  $\sigma_{\Delta N_T}$  и  $\Delta F_k$  непосредственно во время сеанса позиционирования. Поэтому использование выражения (12) потребителем в случае возникновения ИИО практически невозможно, так как потребители не обладают всей необходимой информацией о наличии в ионосфере ОПИ, ее параметрах и

координатах. Решить эту проблему может создание локальных ИСМИ, которые будут постоянно проводить измерения параметров НРС всех видимых НКА. С базовой станцией (БС) данной ИСМИ должна быть связана НАП пользователей этой системы. Возможно, что подобная ИСМИ может быть интегрирована в уже существующую систему «ЭРА-ГЛОНАСС», использующую сеть операторов сотовой связи. При этом, очевидно, что при прохождении через сервера операторов сотовой связи будут возникать задержки времени, влияющие на точность позиционирования. Поэтому использование предлагаемой ИСМИ будет рационально только для низкодинамичных наземных объектов (с невысокими скоростями движения). Рациональность использования ИСМИ сохраняется для объектов, скорость которых не превышает 90 км/ч.

Для того чтобы минимизировать погрешность местоопределения в случае возникновения ИИО, ИСМИ должна выполнить ряд перечисляемых ниже действий.

1. Используя измерения параметров НРС, для всех находящихся в зоне радиовидимости НКА, сделать вывод о наличии или отсутствии ОПИ в видимой небесной полусфере и определить значение  $\sigma_{\Delta N_T}$  и  $\Delta F_k$  на трассах распространения сигналов от НКА к базовой станции ИС.

2. Определить координаты ОПИ в местной топоцентрической системе координат (ТСК) и геоцентрической системе координат (ГСК).

3. Получить от потребителей, связанных с ИС, состав НКА рабочего созвездия и выяснить проходят ли выбранные НРС через ОПИ.

4. Если какой-либо из НРС попадает в ОПИ, то для этой радиолинии определить погрешность определения псевдодальности  $\sigma_{D_i}^{ИИО}$  и выдать это значение потребителю для корректировки расчетов во время сеанса позиционирования.

Далее эти операции описываются более подробно.

**Определение наличия и координат ОПИ.** Пусть по орбите движется НКА (рис. 1).

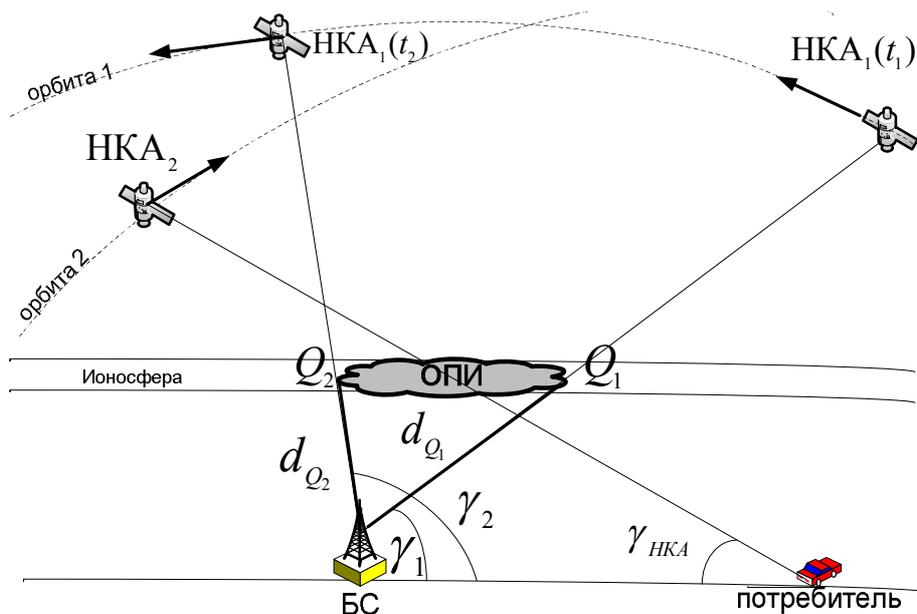


Рис. 1. Определение координат ОПИ

ИСМИ принимает НРС от этого НКА. Если в момент времени  $t_1$  измеренное значение  $\sigma_{\Delta N_T}$  превышает установленное пороговое значение [10], то можно сделать вывод, что НРС попадает в область повышенной ионизации. Данный навигационный аппарат назовем «НКА-индикатор ОПИ». При этом ИС, согласно методике представленной в [2], определяет ширину полосы когерентности трансionoсферного канала связи ( $\Delta F_k$ ) и наличие или отсутствие ЧСЗ радиосигнала. При снижении величины  $\sigma_{\Delta N_T}$  менее порогового значения (в момент времени  $t_2$ ) можно сделать вывод, что НРС вышел из ОПИ. Размеры этой области ограничены точками  $Q_1$  и  $Q_2$ , т.е. точками пересечения трассы НРС и ОПИ. Теперь следует определить координаты этих точек в топоцентрической системе координат ( $NUE$ ), где ось  $N$  направлена на север в плоскости местного горизонта, ось  $U$  – в зенит, ось  $E$  – на восток. Начало координат топоцентрической системы считаем размещенным в точке нахождения БС, положение которой точно известно.

Координаты точек  $Q_1$  и  $Q_2$  в ТСК определяются выражениями [8]:

$$\begin{cases} N_{Q_j} = d_{опи_j} \cdot \cos \gamma_j \cdot \cos \alpha_j \\ U_{Q_j} = d_{опи_j} \cdot \sin \gamma_j \\ E_{Q_j} = d_{опи_j} \cdot \cos \gamma_j \cdot \sin \alpha_j \end{cases}, \quad j=1, 2, \quad (13)$$

где  $\alpha_j, \gamma_j$  – азимут и угол места точки  $Q_j$ , равные азимуту и углу места НКА, сигнал которого попадает в ОПИ;  $d_{опи_j}$  – наклонная дальность точки  $Q_j$ , определяемая [8], как

$$d_{опи_j} = \sqrt{R_3^2 \cdot \sin^2 \gamma_j + h_3 \cdot (2R_3 + h_3)} - R_3 \cdot \sin \gamma_j, \quad (j=1, 2), \quad (14)$$

где  $R_3$  – радиус Земли в точке нахождения потребителя.

Имея координаты точек  $Q_j$  в топоцентрической системе координат нетрудно перевести их в геоцентрические координаты  $(x_{Q_j}, y_{Q_j}, z_{Q_j})$  [16].

Таким образом, принимая НРС всех видимых НКА, ИСМИ может составить «карту» наличия в видимой небесной полусфере областей повышенной ионизации. Далее необходимо определить, попадают ли в эти области радиосигналы аппаратов, выбранных потребителями СРНС в качестве НКА рабочего созвездия. Если выбранные потребителями радиолинии пересекают ОПИ, то ИСМИ должна спрогнозировать возможную ошибку определения псевдодальности и выдать корректирующую поправку соответствующему потребителю.

**Расчет ошибки определения псевдодальности.** Для прогнозирования ошибки определения псевдодальностей до НКА рабочего созвездия необходимо определить, попадает ли в ОПИ НРС аппарата, выбранного потребителем информации в рабочее созвездие. То есть проходит ли НРС от НКА № 2 через эту область или нет (рис. 1).

Выбор рабочего созвездия НКА осуществляется по данным альманаха СРНС. Другими словами, потребитель перед началом сеанса местоопределения знает приблизительные углы места и азимута тех НКА, сигналы которых он возьмет в обработку. В то же время, имея координаты точек ОПИ в геоцентрической системе координат  $[x_{Q_j}, y_{Q_j}, z_{Q_j}]$ , можно найти координаты этих точек ( $Q_j$ ) в местной ТСК ( $N_Q'' U_Q'' E_Q''$ ) с центром в точке начального приближения потребителя  $[X_0, Y_0, Z_0]$ . Матрицы пересчета из геоцентрической системы координат в ТСК и обратно приведены в [3, 7, 15].

Азимут ( $\alpha_Q$ ) и угол места ( $\gamma_Q$ ) определяются согласно [6]:

$$\left. \begin{aligned} \alpha_Q &= \arcsin \frac{E_Q''}{\sqrt{(N_Q'')^2 + (E_Q'')^2}}, \quad \text{sign}(\cos \alpha_Q) = \text{sign}(N_Q'') \\ \gamma_Q &= \arcsin \frac{U_Q''}{\sqrt{(N_Q'')^2 + (E_Q'')^2 + (U_Q'')^2}} \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

Теперь, зная угловые координаты точек  $Q_j$  в местной ТСК ( $\alpha_1, \gamma_1$ ) и ( $\alpha_2, \gamma_2$ ), а также угловые координаты выбранного НКА ( $\alpha_{НКА}, \gamma_{НКА}$ ), можно определить, проходит ли сигнал от этого НКА через ОПИ.

Сначала необходимо выяснить совпадает ли азимут НКА, сигнал которого берется в обработку ( $\alpha_{НКА}$ ), с азимутом обнаруженной ОПИ. Возможны несколько случаев совпадения этих азимутов. Если выполняется одна из систем неравенств

$$\left\{ \begin{aligned} \alpha_{НКА} > \alpha_{Q_1} \\ \alpha_{НКА} \geq \alpha_{Q_2} \\ \alpha_{Q_2} > \alpha_{Q_1} + \pi \end{aligned} \right\}; \left\{ \begin{aligned} \alpha_{НКА} \leq \alpha_{Q_1} \\ \alpha_{НКА} < \alpha_{Q_2} \\ \alpha_{Q_2} > \alpha_{Q_1} + \pi \end{aligned} \right\}; \left\{ \begin{aligned} \alpha_{Q_1} \leq \alpha_{НКА} \leq \alpha_{Q_2} \\ \alpha_{Q_2} > \alpha_{Q_1} \\ \alpha_{Q_2} \leq \alpha_{Q_1} + \pi \end{aligned} \right\}; \left\{ \begin{aligned} \alpha_{НКА} \leq \alpha_{Q_1} \\ \alpha_{НКА} \leq \alpha_{Q_2} \\ \alpha_{Q_1} > \alpha_{Q_2} \end{aligned} \right\}, \quad (16)$$

то, очевидно, что НКА, сигнал которого будет взят в обработку потребителем, находится в той же части видимой небесной полусферы, что и ОПИ. В этом случае необходимо проверить совпадение угла места НКА ( $\gamma_{НКА}$ ) и угла места ОПИ. Для этого надо проверить выполнение одной из следующих систем неравенств

$$\left\{ \begin{aligned} \gamma_{Q_1} \leq \gamma_{НКА} \leq \gamma_{Q_2} \\ \gamma_{Q_1} \leq \gamma_{Q_2} \end{aligned} \right\} \quad \text{или} \quad \left\{ \begin{aligned} \gamma_{Q_2} \leq \gamma_{НКА} \leq \gamma_{Q_1} \\ \gamma_{Q_2} \leq \gamma_{Q_1} \end{aligned} \right\}. \quad (17)$$

Если системы неравенств (16–17) не выполняются, то можно сделать вывод, что НРС не проходит через ОПИ, обнаруженную ИСМИ. В этом случае потребитель при определении своих координат может работать в штатном режиме, т.е. без внесения поправок.

В противном случае сигнал проходит через ОПИ и возникает необходимость прогноза погрешности местоопределения при использовании этого НРС в дальнейшей обработке. Информационная си-

стема мониторинга ионосферы должна определить возможную погрешность определения псевдодальности и выдать рекомендации потребителю либо на продолжение работы в штатном режиме, либо на устранение погрешности измерений. Для этого необходимо измеренное ИС значение  $\sigma_{\Delta N_T}$  для «НКА – индикатора ОПИ» пересчитать для радиолинии «НКА – потребитель» (для НКА из рабочего созвездия). Для пересчета  $\sigma_{\Delta N_T}$ , измеренного для «НКА – индикатора», в  $\sigma_{\Delta N_T}^C$  для рабочего НКА (рис. 1, НКА № 2) необходимо учесть угол места ( $\gamma_{НКА}$ ) этого НКА. Величина  $\sigma_{\Delta N_T}^C$  определяется выражением

$$\sigma_{\Delta N_T}^C = \sigma_{\Delta N_T} \sqrt{\cos \Theta / \sin \gamma_{НКА}}. \tag{18}$$

С учетом (4), (18) выражение для полосы когерентности трансionoсферного канала «НКА – потребитель» (7) примет вид :

$$\Delta F_k^C = \frac{cf_0^2 \sqrt{\sin \gamma_{НКА}}}{80,8\pi \sigma_{\Delta N_T} \sqrt{\cos \Theta (2 + g_1^2)}}, \tag{19}$$

где

$$g_1^2 = \frac{(3z^2 - 3zh_3 + h_3^2)c^2}{192\pi^2 f_0^2 \gamma_{НКА}^4 \sin^2 \gamma_{НКА}}, \tag{20}$$

Теперь с учетом (18) выражение (12) для погрешности определения псевдодальности ( $\sigma_{D_{НКА}}^{ИИО}$ ) в радиолинии «НКА – потребитель» при попадании этого НРС в область повышенной ионизации примет вид

$$\sigma_{D_{НКА}}^{ИИО} = c \left[ \frac{40,4}{cf_0^2} \sigma_{\Delta N_T} \sqrt{\cos \Theta / \sin \gamma_{НКА}} + \frac{1}{\sqrt{2\pi h^2 \Delta F_0}} \sqrt{\left(1 + \frac{4\Delta F_0^2}{\pi (\Delta F_k^C)^2}\right) + h^2 \left(1 + \frac{4\Delta F_0^2}{\pi (\Delta F_k^C)^2}\right)^{3/2}} \right]. \tag{21}$$

При этом следует помнить, что используемый в (19) и (21) зенитный угол  $\Theta$  – это угол «НКА – индикатора». Используемая в (2) величина  $l_S$  определяется согласно (11). Выражение (21) позволяет рассчитать погрешность определения псевдодальности в случае, если НРС аппарата из рабочего созвездия потребителя проходит через ОПИ в ионосфере. Параметры ОПИ определены по измерениям сигнала «НКА – индикатора ОПИ», проведенным базовой станцией ИСМИ.

Примерная функциональная схема разрабатываемой ИСМИ приведена на рисунке 2. В своем составе она должна будет иметь, как измерительные блоки, так и мощные вычислительные средства, позволяющие оперативно отслеживать и рассчитывать параметры не менее чем в 30 радиолиниях. Для оценки необходимых параметров ИСМИ было сочтено целесообразным выполнить имитационное моделирование.

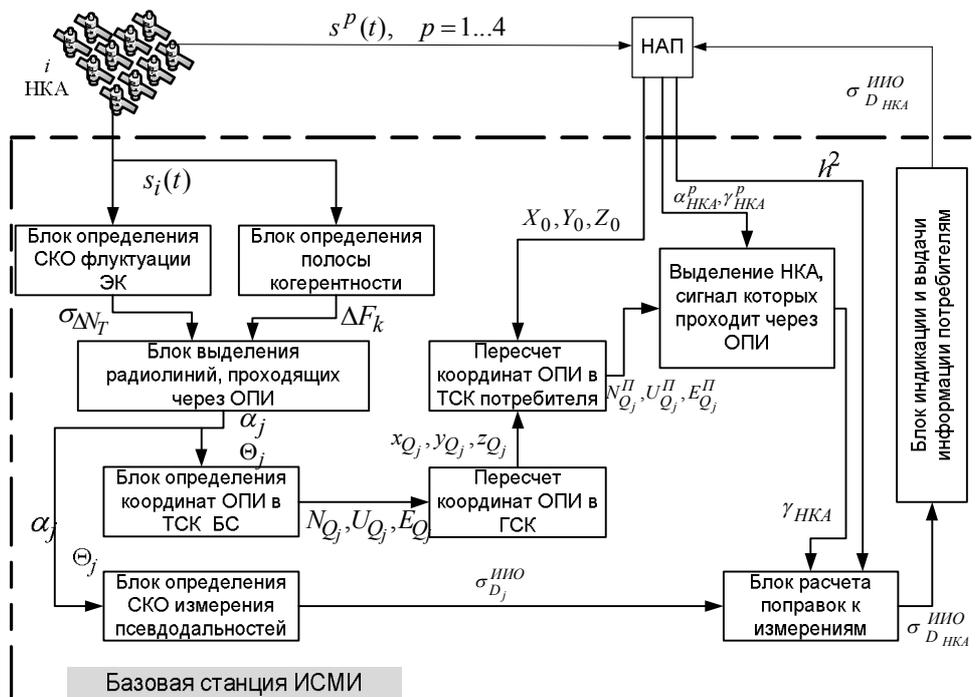


Рис. 2. Схема информационной системы мониторинга ионосферы

**Результаты моделирования.** С использованием соотношений, полученных в данном исследовании, было проведено компьютерное моделирование работы ИСМИ. Эфемериды НКА были взяты из Ripeх-файлов, размещенных в сети Интернет, в которых хранятся промежуточные измерения, проводимые навигационным приемником. Параметры НРС и невозмущенной ионосферы были приняты следующими: частота НРС  $f_0 = 1,2$  ГГц; ширина спектра сигнала  $\Delta F_0 = 10$  МГц; отношение энергии принимаемого НРС к спектральной плотности мощности шума  $h^2 = 46$  дБГц; высота верхней границы ионосферы  $z = 600$  км; эквивалентная толщина ионосферы  $h_s = 500$  км. Было принято, что погрешность измерения псевдодальности при спокойной и естественновозмущенной ионосфере  $\sigma_D \leq 20$  м.

При моделировании ионосферных возмущений было принято допущение: СКО интегральной ЭК в ионосфере в наклонной радиолнии  $\sigma_{\Delta N_r} = 10^{17}$  эл/м<sup>2</sup>, что соответствует сильновозмущенной ионосфере с величиной СКО флуктуаций ЭК в неоднородностях ионосферы  $\sigma_{\Delta N} \approx 10^{13}$  эл/м<sup>3</sup>. Моделирование проводилось для 14-ти различных рабочих созвездий, когда в ОПИ попадал сигнал одного из НКА. При этом расчеты проводились для двух случаев: когда степень ЧСЗ радиосигнала  $\Delta F_0/\Delta F_k = 2$  и  $\Delta F_0/\Delta F_k = 5$ .

Порядок действий при моделировании был следующий.

1. Базовая станция ИСМИ с координатами X = 3738371,881 м; Y = 1148161,0587 м; Z = 5021811,959 м проводит измерения по всем видимым НКА.

2. Потребитель, находящийся от БС на расстоянии 245 км, передает ей состав выбранного рабочего созвездия.

3. В ТСК с центром в БС ИСМИ задаются координаты ОПИ с вышеприведенными параметрами; определяется «НКА – индикатор ОПИ». ИСМИ рассчитывает величину характерного размера ионосферных неоднородностей ( $l_s$ ). Также пересчитываются координаты ОПИ в ТСК потребителя.

4. ИСМИ определяет, попадает ли сигнал какого-либо из НКА рабочего созвездия потребителя в ОПИ. Если попадает, то для этой радиолнии рассчитывается величина полосы когерентности  $\Delta F_k^C$ . Затем определяется согласно (21) погрешность определения псевдодальности ( $\sigma_{D_{НКА}}^{ИИО}$ ) в радиолнии «НКА – потребитель». Эта величина в качестве поправки выдается потребителю.

5. Потребитель информации, с учетом поправки  $\sigma_{D_{НКА}}^{ИИО}$ , решает навигационную задачу и определяет свои координаты.

Результаты расчета величины характерного размера ионосферных неоднородностей  $l_s$ , согласно (11), при различных значениях ЧСЗ сигнала ( $\Delta F_0/\Delta F_k$ ) и зенитном угле «НКА-индикатора ОПИ» ( $\Theta$ ) представлены в таблице 1.

Таблица 1. Рассчитанный размер ионосферных неоднородностей  $l_s$

$\Theta$ , градус	27,8	53,4	56,9	62,7	65	71,2	75,5	76	79,5	83
	Характерный размер ионосферных неоднородностей $l_s$ , м									
$\frac{\Delta F_0}{\Delta F_k} = 2$	89,8	109,4	114,24	124,7	130,1	148,5	168,9	171,1	197,3	242,1
$\frac{\Delta F_0}{\Delta F_k} = 5$	56,2	68,5	71,6	78,2	81,5	93,1	105,8	107,2	123,7	151,7

Размер ионосферных неоднородностей ( $l_s$ ) обратно пропорционален сужению полосы когерентности трансionoсферного канала ( $\Delta F_0/\Delta F_k$ ). То есть при сильных ионосферных возмущениях в толще ионосферы будет наблюдаться множество ионосферных неоднородностей небольшого масштаба. Это согласуется с положениями, определенными в [8].

В данном исследовании утверждается, что полученное выражение (11) позволяет оценить характерный размер ионосферных неоднородностей ( $l_s$ ) по данным измерений значения полосы когерентности трансionoсферного канала связи ( $\Delta F_k$ ) и СКО интегральной ЭК в ионосфере в наклонной радиолнии ( $\sigma_{\Delta N_r}$ ).

Ниже, на рисунке 3 приведены результаты решения навигационной задачи потребителем без учета ошибки измерения псевдодальности при ИИО ( $\sigma_{D_{НКА}}^{ИИО}$ ) и с учетом этой поправки, рассчитанной ИСМИ. В качестве НКА, сигнал которого попадает в ОПИ выбирался, как правило пригоризонтный аппарат, так как подобная ситуация является наихудшей (с точки зрения величины ошибки) и чаще встречающейся. Анализ результатов на рисунке 3 показывает, что в обоих случаях ( $\Delta F_0/\Delta F_k = 2$  и  $\Delta F_0/\Delta F_k = 5$ ) возникновение ЧСЗ даже в одной радиолнии приведет к ошибкам местопределения порядка  $10^2 \dots 10^3$  м. Таким образом расчет величины  $\sigma_{D_{НКА}}^{ИИО}$  и использование ее в решении навигационной задачи позволит снизить погрешность местопределения до 15–50 м., т.е. в 10–20 раз.

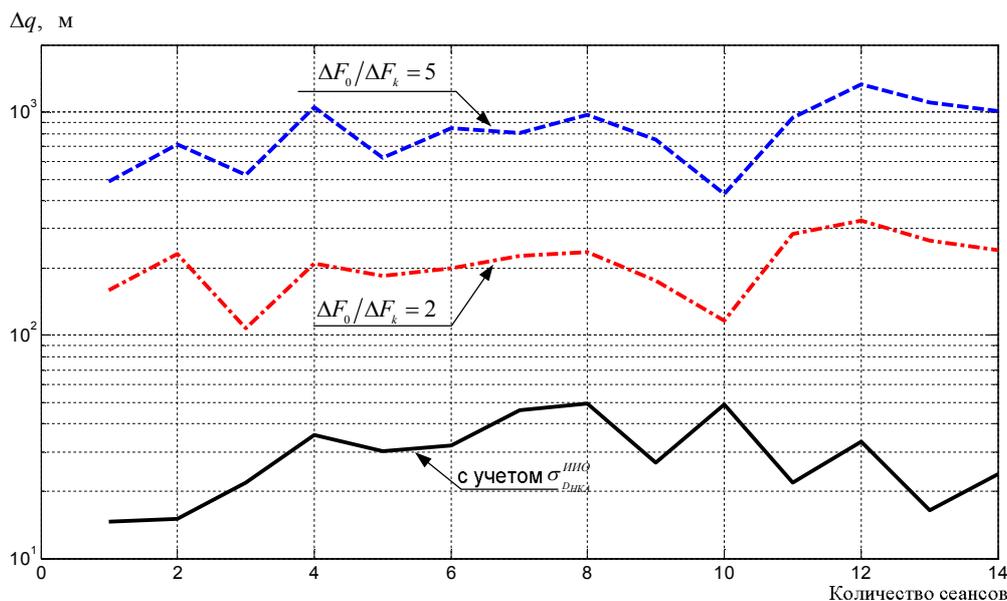


Рис. 3. Ошибка местоопределения потребителя  $\Delta q$  при ИИО без учета ошибки  $\sigma_{ДНКА}^{ИИО}$  и с учетом рассчитанного значения  $\sigma_{ДНКА}^{ИИО}$

Следует отметить, что при возникновении ЧСЗ основной вклад в погрешность местоопределения вносит погрешность измерений псевдодальностей  $\sigma_{ДНКА}^{ИИО}$ , которая будет зависеть от того, сигнал какого НКА попадает в ОПИ.

**Заключение.** Представленная методика определения псевдодальности до НКА при возникновении ИИО позволит снизить погрешность местоопределения потребителей СРНС. Для этого необходимо создание ИСМИ и подключение к этой системе потребителей, возможно, с интегрированием ИСМИ в уже существующую сеть «ЭРА-ГЛОНАСС». Создание такой ИСМИ не требует оснащения каждого потребителя сложной измерительной аппаратурой. Очевидно, что в случае возникновения небольших ИИО есть смысл перейти на альтернативное рабочее созвездие, где радиолнии не будут подвергаться ЧСЗ. Впрочем, такая возможность в случае дефицита НКА или наличия множественных ИИО может не представиться. Поэтому для низкодинамичных наземных потребителей снижение погрешности позиционирования с тысяч метров до десятков метров будет несомненным выигрышем. Приведенные результаты показывают, что использование рассчитанного ИСМИ СКО определения псевдодальности до НКА рабочего созвездия потребителя на основе измерений радиосигнала «НКА – индикатора ОПИ» позволит снизить ошибку местоопределения до приемлемого уровня. Целью дальнейших исследований в данном направлении будет являться детальная проработка необходимых характеристик и проектирование подобной ИСМИ.

#### Список литературы

1. Афраймович Э. Л. GPS-мониторинг верхней атмосферы Земли / Э. Л. Афраймович, Н. П. Перевалова. – Иркутск : ГУ НЦ ВСНЦ СО РАН, 2006. – 480 с.
2. Катков К. А. Алгоритм определения наличия областей повышенной ионизации в ионосфере / К. А. Катков, Н. Н. Гахова // Научные технологии. – 2012. – Т. 13, № 7. – С. 8–15.
3. Катков К. А. Информационная система мониторинга ионосферы / К. А. Катков, В. П. Пашинцев, Е. К. Катков // Известия Самарского научного центра РАН. – 2016. – Т. 18, № 2 (3). – С. 907–912.
4. Катков К. А. Влияние параметров возмущенной ионосферы на ошибку слежения за фазой навигационного радиосигнала / К. А. Катков, В. П. Пашинцев, Е. К. Катков // Современная наука и инновации. – 2016. – № 2 (14). – С. 52–64.
5. Леммле Д. В. Характеристики передачи сигналов OFDM в многолучевых каналах / Д. В. Леммле // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. – 2015. – № 2 (30). – С. 207–216 ([http://hi-tech.asu.edu.ru/files/2\(30\)/207-216.pdf](http://hi-tech.asu.edu.ru/files/2(30)/207-216.pdf)).
6. Лобанов Б. С. Исследование возможности создания в ионосфере объемных образований, эффективно взаимодействующих с электромагнитным излучением в сверхшироком диапазоне частот / Б. С. Лобанов // Теория и техника радиосвязи. – 2009. – № 3. – С. 16–24.
7. Мамон П. А. Баллистическое обеспечение космических полетов : учебное пособие / П. А. Мамон, В. И. Пончиков, С. К. Слезкинский. – Ленинград : ВИКИ им. А.Ф. Можайского, 1980. – 622 с.
8. Пашинцев В. П. Спутниковая навигация при ионосферных возмущениях / В. П. Пашинцев, К. А. Катков, Р. П. Гахов, О. П. Малофей, В. А. Шевченко. – Ставрополь : СевКавГТУ, 2012. – 259 с.

9. Пашинцев В. П. Оценка погрешности измерения псевдодальности в спутниковых радионавигационных системах при возмущениях ионосферы в слое F / В. П. Пашинцев, М. Э. Солчатов, А. М. Спирин, К. А. Катков // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. – 2007 – Т.10, № 6. – С. 8–13.
10. Пашинцев В. П. Устройство обнаружения искусственных ионосферных образований с мелкомасштабными неоднородностями / В. П. Пашинцев, С. А. Коваль, В. И. Стрекозов и другие // Патент на полезную модель RU 154138 U1 от 20.08.2015.
11. Сергеев Е. Н. Результаты комплексных исследований возмущенной области ионосферы с помощью коротковолновой локации в широкой полосе частот и искусственного радиоизлучения ионосферы / Е. Н. Сергеев, Е. Ю. Зыков, А. Д. Акчурин, И. А. Насыров, Г. Г. Вертоградов, В. Г. Вертоградов, В. Ю. Ким, В. П. Полиматиди, С. М. Грач // Известия высших учебных заведений. Радиофизика. – 2012. – Т. 55, № 1–2. – С. 79–93.
12. Слюсарев Г. В. Устройство определения степени частотно-селективных замираний навигационных радиосигналов спутниковых радионавигационных систем / Г. В. Слюсарев, Р. В. Анашкин, К. А. Катков и другие // Патент на полезную модель RUS 93525 от 02.12.2009.
13. Тепляков И. М. Ионосферные искажения цифровых сигналов с широкополосной модуляцией / И. М. Тепляков // Радиотехника. – 1984. – № 8. – С. 8–13.
14. Харисов В. Н. Глобальная спутниковая радионавигационная система ГЛОНАСС / В. Н. Харисов, А. И. Перова, В. А. Болдина. – Москва : ИПРЖР, 1998. – 680 с.
15. Шебшаевич В. С. Сетевые спутниковые радионавигационные системы / В. С. Шебшаевич, П. П. Дмитриев, Н. В. Иванцевич и другие. – Москва : Радио и связь, 1993. – 408 с.
16. Yannick Béniguel. Scintillations effects on satellite to Earth links for telecommunication and navigation purposes / Yannick Béniguel, Biagio Forte, Sandro M. Radicella, Hal J. Strangeways, Vadim E. Gherm and Nikolay N. Zernov // Annals of geophysics. – 2004. – Vol. 47, № 2/3. – P. 1179–1199.
17. Robert S. Conker. Modeling the effects of ionospheric scintillation on GPS/Satellite-Based Augmentation System availability / Robert S. Conker, M. Bakry El-Arini, Christopher J. Hegarty and Thomas Hsiao // Radio Science. – 2003. – Vol. 38, № 1. – P. 1–23. DOI10.1029/2000rs002604.
18. Smirnov V. Hardware and software complex monitoring the Earth ionosphere / V. Smirnov, E. Smirnova, V. Skobelkin, S. Tynyankin // Proceedings of the 40<sup>th</sup> SCIENTIFIC ASSEMBLY COSPAR. – Russia, Moscow, August 2–10 2014. – P.1–14.

#### References

1. Afraymovich E. L., Perevalova N. P. *GPS-monitoring verkhney atmosfery i Zemli* [GPS monitoring of the upper atmosphere of the Earth], Irkutsk, GU NC VSNTs SO RAMN [GU NC VSNTs SO RAMN Publ. House, 2006. 480 p.
2. Katkov K. A., Gahova N. N. Algoritm opredeleniya nalichiya oblastey povyshennoy ionizatsii v ionosphere [The algorithm of determining the presence of regions of increased ionization in the ionosphere]. *Naukoemkie tekhnologii* [High Technologies], 2012, vol. 13, no. 7, pp. 8–15.
3. Katkov K. A., Pashintsev V. P., Katkov Ye. K. Informatsionnaya sistema monitoringa ionosfery [Information system of monitoring of the ionosphere]. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra RAN* [Proceedings of the Samara Scientific Center, RAS], 2016, vol 18, no. 2 (3), pp. 907–912.
4. Katkov K. A., Pashintsev V. P., Katkov Ye. K. Vliyaniye parametrov vozmushchennoy ionosfery na oshibku slezheniya za fazoy navigatsionnogo radiosignala [Influence of parameters of the disturbed ionosphere to the error tracking phase, navigation radio signal]. *Sovremennaya nauka i innovatsii* [Modern Science and Innovation], 2016, no. 2 (14), pp. 52–64.
5. Lemmlé D. V. Kharakteristiki peredachi signalov OFDM v mnogoluchevykh kanalakh [The transmission characteristics of OFDM signals in multipath channels]. *Prikaspiyskiy zhurnal: upravlenie i vysokie tekhnologii* [Caspian Journal: Management and High Technologies], 2015, no. 2 (30), pp. 207–216 ([http://hi-tech.asu.edu.ru/files/2\(30\)/207-216.pdf](http://hi-tech.asu.edu.ru/files/2(30)/207-216.pdf)).
6. Lobanov B. S. Issledovanie vozmozhnosti sozdaniya v ionosphere obemnykh obrazovaniy, effektivno vzaimodeystviyushchikh s elektromagnitnym izlucheniem v sverkhshirokom diapazone chastot [Study the possibility of creating in the ionosphere lesions, effectively interacting with electromagnetic radiation in superwide frequency range]. *Teoriya i tekhnika radiosvyazi* [Theory and Technique of Radio Communication], 2009, no. 3, pp. 16–24.
7. Mamon P. A., Polovnikov V. I., Slezkinskiy S. K. *Ballisticheskoye obespechenie kosmicheskikh poletov* [Ballistic support of space flights], Leningrad, Military engineering Institute named Mozhaysky publ. House, 1980. 622 p.
8. Pashintsev V. P., Katkov K. A., Gakhov R. P., Malofey O. P., Shevchenko V. A. *Sputnikovaya navigatsiya pri ionosfernykh vozmushcheniyakh* [Satellite navigation with ionospheric disturbances], Stavropol, NCSTU Publ. House, 2012. 259 p.
9. Pashintsev V. P., Solchatov M. E., Spirin A. M., Katkov K. A. Otsenka pogreshnosti izmereniya pсевдодальности v sputnikovykh radionavigatsionnykh sistemakh pri vozmushcheniyakh ionosfery v sloe F [Assessment of measurement error in the pseudo range of satellite navigation systems when the disturbances of the ionosphere in the F layer]. *Fizika volnovykh protsessov i radiotekhnicheskie sistemy* [Physics of Wave Processes and Radiotechnical Systems], 2007, vol 10, no. 6, pp. 8–13.
10. Pashintsev V. P., Koval S. A., Strekozov V. I., et al. Ustroystvo obnaruzheniya iskusstvennykh ionosfernykh obrazovaniy s melkomasshtabnymi neodnorodnostyami [Device detection of artificial ionospheric structures with small-scale inhomogeneities]. *The patent for useful model RU 154138 U1 from 20.08.2015*.
11. Sergeev Ye. N., Zыkov Ye. Yu., Akchurin A. D., Nasyrov I. A., Vertogradov G. G., Vertogradov V. G., Kim V. Yu., Polimatidi V. P., Grach S. M. Rezultaty kompleksnykh issledovaniy vozmushchennoy oblasti ionosfery s pomoshchyu korotkovolnovoy lokatsii v shirokoy poloshe chastot i iskusstvennogo radioizlucheniya ionosfery [The results of complex studies of the disturbed region of the ionosphere with shortwave locations in a wide band of frequencies and artificial radio emission of the ionosphere]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Radiofizika* [Proceedings of the Higher Educational Institutions. Radiophysics], 2012, vol. 55, no. 1–2, pp. 79–93.

12. Slusarev G. V., Anashkin R. V., Katkov K. A., et al. Ustroystvo opredeleniya stepeni chastotno-selektivnykh zamiraniy navigatsionnykh radiosignalov sputnikovyykh radionavigatsionnykh sistem [The device determine the degree of frequency-selective fading radio signals of the navigation satellite navigation systems]. *The patent for useful model RUS 93525 from 02.12.2009*.

13. Teplyakov I. M. Ionosfernie iskazeniya tsifrovyykh signalov s shirokopolosnoy modulyatsiyey [Ionospheric distortion of the digital signal with a wideband modulation]. *Radiotekhnika* [Radio Engineering], Moscow, 1984, no. 8, pp. 8–13.

14. Kharisov V. N., Perova A. I., Boldina V. A. *Globalnaya sputnikovaya radionavigatsionnaya sistema GLONASS* [Global satellite radio navigation GLONASS system], Moscow, IPRZHR Publ. House, 1998. 680 p.

15. Shebshaevich V. S., Dmitriev P. P., Ivantsevich N. V. Setevye sputnikovye radionavigatsionnye sistemy [Network satellite radio navigation system]. *Radio i svyaz* [Radio and Communication], Moscow, 1993. 408 p.

16. Yannick Béniguel, Biagio Forte, Sandro M. Radicella, Hal J. Strangeways, Vadim E. Gherm and Nikolay N. Zernov Scintillations effects on satellite to Earth links for telecommunication and navigation purposes. *Annals of geophysics*, 2004, vol. 47, no. 2/3, pp. 1179–1199.

17. Robert S. Conker, M. Bakry El-Arini, Christopher J. Hegarty and Thomas Hsiao Modeling the effects of ionospheric scintillation on GPS/Satellite-Based Augmentation System availability. *Radio Science*, 2003, vol. 38, no. 1, pp. 1–23. Doi:10.1029/2000rs002604.

18. Smirnov V., Smirnova E., Skobelkin V., Tynyankin S. Hardware and software complex monitoring the Earth ionosphere. *Proceedings of the 40<sup>th</sup> SCIENTIFIC ASSEMBLY COSPAR*, Russia, Moscow, August 2–10 2014, pp. 1–14.

УДК:621.311.13, 004.3

### РАЗРАБОТКА МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНОГО АНАЛИЗАТОРА ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ ДЛЯ КОНТРОЛЯ АВТОНОМНЫХ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

*Статья поступила в редакцию 25.04.2017, в окончательном варианте – 23.06.2017.*

**Асиев Абай Турусбекович**, Кыргызский государственный технический университет им. И. Раззакова, 720044, Кыргызская Республика, г. Бишкек, пр. Чынгыза Айтматова, 66,

кандидат технических наук, заведующий отделом науки, ORCID <http://orcid.org/0000-0002-2013-6314>, e-mail: [asievat@gmail.com](mailto:asievat@gmail.com)

Работа посвящена вопросам создания и применения многофункционального анализатора (МФА) показателей качества электрической энергии (ПКЭ) для контроля автономных систем электроснабжения. Рассмотрены необходимые требования к ПКЭ и мероприятия, направленные на соблюдение требований, указанных в ГОСТ 32144-2013. Определено оборудование в автономной системе электроснабжения (АСЭ), создающее электромагнитные помехи и оказывающее негативное влияние на ПКЭ. Для АСЭ и электроагрегатов, вырабатывающих переменное напряжение, совокупность ПКЭ включает следующее: установившееся отклонение напряжения при изменении симметричной нагрузки (СН); установившееся отклонение напряжения при неизменной СН; переходное отклонение напряжения при сбросе – набросе СН; время восстановления напряжения при сбросе – набросе СН; установившееся отклонение частоты при неизменной СН; переходное отклонение частоты при сбросе – набросе СН; время восстановления частоты при сбросе – набросе СН; коэффициент амплитудной модуляции напряжения частотой 400 Гц при СН, коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения; коэффициент небаланса междуфазных напряжений при несимметричной нагрузке фаз. Поставлены задачи мониторинга показателей КЭЭ. Указаны новые стандарты, регламентирующие методы измерения этих показателей. В качестве объекта для разработки МФА показателей КЭЭ была выбрана АСЭ, которая может применяться в отдаленных населенных пунктах. Рассмотрены особенности технических характеристик современных цифровых анализаторов КЭЭ. Охарактеризована разработка, выполненная автором.

**Ключевые слова:** автономные источники электроснабжения, электроэнергия, показатели качества электрической энергии, методы анализа, математические методы, сплайн-интерполяция, цифровая фильтрация, аппаратные решения, программный комплекс, интерфейс с пользователем

### DEVELOPMENT OF MULTIFUNCTIONAL ANALYZER OF ELECTRICITY QUALITY INDICATORS FOR CONTROL OF AUTONOMOUS ELECTRICAL SUPPLY SYSTEMS

*The article has been received by editorial board 25.04.2017, in the final version – 23.06.2017.*

**Asiev Abay T.**, Kyrgyz State Technical University ater I. Razzakov, 66 Chingiz Aytmatov Ave., Bishkek, 720044, Kyrgyz Republic,

Cand. Sci. (Engineering), Head of the Department of Science, ORCID <http://orcid.org/0000-0002-2013-6314>, e-mail: [asievat@gmail.com](mailto:asievat@gmail.com)

This article is devoted to the development and application of a multifunctional analyzer of quality indicators of electrical power to control autonomous power supply systems. The author considers the necessary requirements for the quality of electrical power and measures aimed at reaching compliance with these requirements specified in GOST 32144-2013. The article defines equipment that creates electromagnetic interference and adversely affects the quality of electric power in