

10. Кибкало А.А., Ляпер В.С., Субботин А.Г., Задорожный В.В. Перспективные системы электронного голосования [Электронный ресурс] // URL: <http://www.i-tc.ru/press/publications/binder7.pdf> (дата обращения: 10.03.2014).
11. Киви Берд. Сделаем это по-честному [Электронный ресурс] // URL: <http://kiwibyrd.org/2013/11/24/122/#more-1149> (дата обращения: 10.03.2014).

Статью рекомендовал к опубликованию к.т.н. М.Н. Казарин.

**Пескова Ольга Юрьевна** – Южный федеральный университет; e-mail: [poy@tgn.sfedu.ru](mailto:poy@tgn.sfedu.ru); 347922, г. Таганрог, ул. Чехова, 2; тел./факс: 88634371905; кафедра безопасности информационных технологий; к.т.н.; доцент.

**Половко Иван Юрьевич** – e-mail: [i.y.polovko@gmail.com](mailto:i.y.polovko@gmail.com); кафедра безопасности информационных технологий; к.т.н.; ассистент.

**Фатеева Светлана Владимировна** – e-mail: [svetlana.fateeva@rambler.ru](mailto:svetlana.fateeva@rambler.ru); кафедра безопасности информационных технологий; студентка.

**Peskova Olga Yur'evna** – Southern Federal University; e-mail: [poy@tgn.sfedu.ru](mailto:poy@tgn.sfedu.ru); 2, Chekhov street, Taganrog, 347922, Russia; phone/fax: +78634371905; the department of security in data processing technologies; cand. of eng. sc.; associate professor.

**Polovko Ivan Yur'evich** – e-mail: [i.y.polovko@gmail.com](mailto:i.y.polovko@gmail.com); the department of security in data processing technologies; cand. of eng. sc.; assistant professor.

**Fateeva Svetlana Vladimirovna** – e-mail: [svetlana.fateeva@rambler.ru](mailto:svetlana.fateeva@rambler.ru); the department of security in data processing technologies; student.

УДК 681.3

**К.А. Катков, Е.К. Катков**

### **ПОВЫШЕНИЕ ИНФОРМАЦИОННОЙ ЗАЩИЩЕННОСТИ СПУТНИКОВЫХ РАДИОНАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМ ПРИ ИСКУССТВЕННЫХ ИОНОСФЕРНЫХ ВОЗМУЩЕНИЯХ**

*Целью исследования является уменьшение погрешности местоопределения потребителей спутниковых радионавигационных систем в условиях намеренного создания искусственных возмущений ионосферы на трассе распространения навигационных радиосигналов. В случае возникновения сильных ионосферных возмущений навигационные радиосигналы неминуемо будут подвержены искажениям, которые приведут к многократному увеличению погрешности измерения псевдодальностей до соответствующих навигационных космических аппаратов. Это, в свою очередь, приведет к резкому возрастанию погрешности местоопределения в навигационной аппаратуре потребителей. В работе представлен разработанный алгоритм вторичной обработки навигационных данных, позволяющий за счет многократного измерения псевдодальности в условиях наличия локальной области повышенной ионизации в выбранном рабочем созвездии НКА снизить погрешность местоопределения. Также представлен алгоритм решения навигационной задачи в условиях дефицита навигационных космических аппаратов, когда искусственные возмущения ионосферы делают невозможным прием навигационной информации от большинства видимых аппаратов.*

*Спутниковые радионавигационные системы; искусственные возмущения ионосферы, вторичная обработка навигационных данных; информационная безопасность спутниковых радионавигационных систем.*

**К.А. Katkov, Е.К. Katkov**

## **IMPROVING THE INFORMATION SECURITY OF THE SATELLITE RADIO NAVIGATION SYSTEMS WITH ARTIFICIAL IONOSPHERIC DISTURBANCES**

*Annotation: The purpose of this research is to reduce the user positioning errors when utilizing satellite radionavigation systems under the conditions of artificial ionospheric disturbances in the propagation path of navigation radiofrequency signals. In the event of severe ionospheric disturbances, navigation radiofrequency signals will lead to multiple increases in the pseudo-range measurements error of the relevant navigation satellites. This, in turn, will lead to a sharp increase in errors position in the navigation consumer equipment. The paper presents an algorithm developed for secondary processing of navigation data, enabling to reduce the positioning error due to multiple pseudo-range measurements in the presence of local region of increased ionization within navigation satellites selected operational constellation. Also algorithm is presented for solving the navigation problem in the conditions of navigation spacecrafts deficiency, when the artificial ionospheric disturbances make it impossible to receive of navigational information from the majority of visible devices.*

*Satellite radionavigation systems; artificial ionospheric disturbances; secondary processing of navigation data; information security of the satellite radio navigation systems.*

**Введение.** Спутниковые радионавигационные системы (СРНС), которые все активнее используются в различных сферах человеческой деятельности, изначально создавались для военных потребителей. Они призваны обеспечить глобальность, точность, непрерывность и высокую достоверность местоопределения широкого круга потребителей. Качество функционирования СРНС, использующих канал распространения радиоволн Космос – Земля, существенно ограничен влиянием околоземного космического пространства. Как показывают исследования [1, 2], наибольшее влияние на радиосигналы СРНС оказывает ионосфера. Именно состояние ионосферы обуславливает погрешность определения пространственно-временных координат (ПВК) потребителя.

Для исключения ионосферной погрешности ряд потребителей СРНС «ГЛОНАСС» и GPS широко использует аппаратуру, применяющую двухчастотный метод измерений псевдодальностей. Он предполагает излучение навигационного радиосигнала (НРС) на двух частотах  $f_1$  и  $f_2$ . Частота  $f_1$  составляет примерно 1,6 ГГц, частота  $f_2$  – приблизительно 1,2 ГГц. При этом навигационные радиосигналы в СРНС имеют широкую полосу спектра ( $\Delta F_0$ ), составляющую 10 МГц. В то же время при сильных искусственных ионосферных возмущениях, создаваемых на высотах ее F-слоя (150...300 км), полоса когерентности трансionoсферного канала связи ( $\Delta F_k$ ) может сужаться до значений 100 кГц и менее [3]. В этом случае в СРНС будет выполняться условие  $\Delta F_0 / \Delta F_k > 1$  возникновения частотно-селективных замираний (ЧСЗ) принимаемых сигналов. Это приведет к росту шумовой погрешности измерения времени запаздывания сигнала с ЧСЗ и определяемой ею псевдодальности по сравнению со случаем отсутствия ЧСЗ (когда  $\Delta F_0 / \Delta F_k \ll 1$ ). Исследования [4] показывают, что при возникновении ЧСЗ использование двухчастотного метода приведет к многократному увеличению погрешности измерений псевдодальностей, что в свою очередь не позволит потребителю точно определить свое местоположение.

Таким образом намеренное искусственное создание в ионосфере сильных неоднородностей многократно снижает степень защиты навигационной информации СРНС от искажений. Внося помехи в канал распространения радиоволн, можно воздействовать на навигационную аппаратуру потребителей СРНС.

Целью статьи является повышение информационной защищенности СРНС, которая позволит с высокой точностью проводить сеансы местоопределения, при сильных ионосферных возмущениях искусственного характера. Решение в таких условиях навигационной задачи традиционным способом дает сильную погрешность, не отвечающую требованиям потребителей.

**Ионосферные возмущения.** Известно [3, 5], что возмущения ионосферы могут происходить под влиянием естественных или искусственных источников ее ионизации. Естественные возмущения ионосферы могут возникать в результате следующего рода случайных изменений солнечной активности [3]: вспышки на Солнце (характеризующиеся энергией  $E \sim 10^{16}$  Дж), магнитные и ионосферные бури ( $E \sim 10^{15}$  Дж), солнечный терминатор ( $E \sim 10^{13}$  Дж), высыпание частиц ( $E \sim 10^{10}$  Дж) и т.д. Кроме того, возмущения ионосферы могут возникать под действием других естественных факторов: землетрясений ( $E \sim 10^{19}$  Дж), извержений вулканов ( $E \sim 10^{20}$  Дж), образования ураганов ( $E \sim 10^{18}$  Дж), молний ( $E \sim 10^{10}$  Дж) и т.д.

Искусственные возмущения ионосферы (ИВИ) возникают в результате действия различного рода антропогенных источников ионизации, сопоставимых по энергии с естественными: аварий атомных электростанций ( $E \sim 10^{18}$  Дж), стартов крупных ракет ( $E \sim 10^{12}$  Дж), включения двигателей искусственных спутников Земли в космосе ( $E \sim 10^7$  Дж), падения крупного космического аппарата ( $E \sim 10^{12}$  Дж), излучения мощных передатчиков радиосистем ( $E \sim 10^{12}$  Дж), взрывов в ионосфере ( $E \sim 10^{11} \dots 10^{17}$  Дж), работы инжекторов плазмы ( $E \sim 10^7$  Дж) и т.д. При этом ИВИ сопровождаются образованием интенсивных мелкомасштабных неоднородностей электронной концентрации (ЭК), вытянутых в виде «волокон» вдоль магнитных силовых линий Земли [6].

Наибольшее число экспериментальных данных по созданию возмущений в  $F$ -слое ионосферы относится к ее искусственному радионагреву [3, 6, 7]. Особую ценность им придает то, что измеряемым параметром в этих исследованиях являлась интенсивность неоднородностей  $\beta$ . При воздействии мощного излучения ( $P_t \sim 1$  МВт) на ионосферу величина  $\beta$ , согласно данным большинства экспериментов, может возрасти от одного до десяти процентов (наибольшее значение, указанное в [8], составляло 14 %).

С середины 90-х годов в США на Аляске (п. Гаккона) функционирует грандиозный комплекс ХААРП (HAARP) для исследования ИВИ в слое  $F$ , создаваемых путем радионагрева. Он обеспечивает в диапазоне 2...10 МГц мощность излучения  $P_t \sim 10^{10}$  Вт. Передающая антенна занимает площадь 60 км<sup>2</sup> и представляет собой фазированную антенную решетку, состоящую из 360 антенн 24-метровой высоты. Такой радионагревный комплекс обеспечивает мощность излучения в ионосферу, которая превышает солнечное в  $10^6$  раз.

Очевидно, что подобный радионагрев приведет к возрастанию интенсивности ионосферных неоднородностей, которая, в конечном счете, окажет влияние на качество радиоканала СРНС в виде частотно-селективных замираний НРС.

**Обнаружение области повышенной ионизации.** Создание ИВИ в слое  $F$  характеризуется количественным изменением значений таких физических параметров ионосферы, как интенсивность неоднородностей  $\beta$  и максимальная сред-

ная электронная концентрация (ЭК)  $\bar{N}_m$ , обуславливающих возрастание величины среднего квадратичного отклонения (СКО) флуктуаций ЭК в неоднородностях ионосферы  $\sigma_{\Delta N} = \beta \bar{N}_m$ .

Экспериментальные и теоретические исследования [6] по оценке влияния рассеивающих свойств искусственно возмущенной ионосферы на характеристики космических систем передачи информации показывают, что в условиях ИВИ рассеивающие свойства её неоднородностей вызывают мерцания, которые могут проявляться как общие, так и частотно-селективные замирания. При этом тип возникающих замираний зависит от несущей частоты  $f_0$  и от ширины спектра  $\Delta F_0$  передаваемых сигналов. При использовании широкополосных сигналов в космических средствах передачи информации ухудшение их характеристик при ИВИ может быть более значительным, чем при использовании узкополосных радиосигналов [5]. При ИВИ, создаваемых на высотах её F-слоя, полоса когерентности трансionoсферного канала связи  $\Delta F_K$  сужается и становится меньше ширины спектра НРС. Отношение  $\Delta F_0/\Delta F_K$  назовем степенью ЧСЗ принимаемых НРС.

Можно предположить, что НРС, который подвергается ЧСЗ, будет проходить через область повышенной ионизации (ОПИ). При этом, если только часть навигационных сигналов будет подвергаться ЧСЗ, то можно сделать вывод о локальности ОПИ. Следует заметить, что ЧСЗ принимаемых НРС может возникнуть уже после прохождения их через ионосферу. Поэтому, для вывода о наличии ионосферных возмущений необходимо определять величину СКО флуктуаций ЭК в неоднородностях ионосферы  $\sigma_{\Delta N}$ .

Таким образом, признаками наличия ОПИ в ионосфере будут являться увеличение СКО флуктуаций ЭК в неоднородностях ионосферы  $\sigma_{\Delta N}$ , и возникновение ЧСЗ  $\Delta F_0/\Delta F_K > 1$  на трассе распространения НРС.

Способ определения полного электронного содержания (ПЭС) ионосферы с учетом её неоднородностей по данным двухчастотного радионавигационного приемника СРНС базируется на выражении [9]

$$N_s = \frac{f_1^2 \cdot f_2^2}{40.3(f_1^2 - f_2^2)} (L_1 \cdot \lambda_1 - L_2 \cdot \lambda_2), \quad (1)$$

где  $f_1, f_2$  – несущие частоты НРС;  $L_1, L_2$  – число оборотов фазы радиосигналов;  $\lambda$  – длина волны на частоте  $f_m$  ( $m=1; 2$ ).

Имея ряд оценок ПЭС, проведенных за интервал времени  $T$ , получают значение СКО ПЭС:

$$\sigma_N = \sqrt{\int_0^T (N_s(t) - \bar{N}_s(t))^2 dt}, \quad (2)$$

где  $\bar{N}_s(t)$  – математическое ожидание величины ПЭС.

Согласно [5], величину СКО флуктуации ЭК в неоднородностях ионосферы  $\sigma_{\Delta N}$  на трассе прохождения  $i$ -го НРС можно оценить как

$$\sigma_{\Delta Ni} \approx \sqrt{\frac{\sigma_N \cdot \sin \gamma_i}{\sqrt{\pi} \cdot h_E \cdot l_S}}, \quad (3)$$

где  $\mathcal{Y}$  – угол места НКА;  $h_3 \approx 400$  км – высота эквивалентной ионосферы,  $l_s$  – характерный размер ионосферных неоднородностей (обычно принимается  $l_s \approx 400...600$  м).

Необходимо заметить, что данная оценка является приблизительной. Кроме этого, использование данного способа определения  $\sigma_{\Delta N}$  потребует отказа от одномоментных измерений псевдодальности и проведения измерений в течение интервала времени  $T$ .

Для определения факта наличия и степени ЧСЗ радиосигнала навигационная аппаратура потребителя СРНС должна иметь информацию о величине полосы когерентности трансionoсферного канала связи  $\Delta F_k$ . В то же время, отсутствие точной информации о размерах ионосферных неоднородностей ( $L_0, L_m$ ), не позволяет точно определить эту величину.

Для того чтобы определить величину  $\Delta F_k$  при неизвестных априорно  $L_0, L_m$  предлагается разделить широкополосный НРС на спектральные составляющие и проверить условие их коррелированности. Широкополосный НРС с шириной спектра  $\Delta F_0$  с помощью полосовых фильтров делится на частотные составляющие с шагом  $\Delta\Omega$  в течение промежутка времени  $T = 1 \div 5$  сек. Тем самым выделяются составляющие спектра  $f_{-n}, \dots, f_{-1}, f_0, f_1, \dots, f_n$ , симметричные относительно средней частоты спектра  $f_0$ . Затем определяется коэффициент корреляции между симметричными частотными составляющими:  $f_1$  и  $f_{-1}$ ;  $f_2$  и  $f_{-2}$ ; ...;  $f_n$  и  $f_{-n}$ . Корреляционная функция навигационного радиосигнала имеет вид [10]

$$K(\Delta F_0) = e^{-(\Delta F_0/\Delta F_k)^2}. \quad (4)$$

При выполнении условия возникновения ЧСЗ  $\Delta F_0/\Delta F_k = 1$  коэффициент корреляции становится равен  $K(\Delta F_0) = e^{-1} \approx 0.37$ . 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  $\Delta F_k$ .

Выбор шага разложения спектра сигнала проводится из соображений точности, с которой необходимо измерить величину  $\Delta F_k$ , и количества полосовых фильтров, необходимых для разложения исходного сигнала на спектральные составляющие (например, 10 кГц или 100 кГц).

Имея многоканальную навигационную аппаратуру потребителя (НАП), необходимо из всего множества  $n$  наблюдаемых НКА определить те НКА, сигнал которых проходит через ОПИ, а, следовательно, подвергается ЧСЗ. Полученный результат выступает в качестве исходных данных в алгоритме вторичной обработки навигационных параметров, применение которого позволяет снизить погрешность местоопределения пользователя.

**Определение вектора пвк потребителя.** Для оценки значения псевдодальности используем метод оптимальной линейной фильтрации (фильтр Калмана) [11]. Для этого предлагается провести  $m$  измерений псевдодальности в условиях действия ИВИ  $\overline{D}_1, \dots, \overline{D}_k$  за период времени  $T$  с интервалом  $\Delta t$ . Затем, по данным измерений определить уточненную оценку  $D_m^* = f(\overline{D}_k, k = 1..m)$  для величины  $D_k$  в момент времени  $t_m$ . Современная НАП проводит измерения с шагом 20 мсек. Модель измерений имеет вид

$$\overline{D}_k = D_k + N, \quad (5)$$

где  $N$  – шумовая погрешность, обусловленная действием ИВИ, распределенная по нормальному закону с математическим ожиданием  $M(N) = 0$  и дисперсией равной  $S_D^{(4)2}$ . Тогда модель движения системы определяется выражением:

$$D_{k+1} = D_k + V_k \cdot \Delta t, \quad (6)$$

где  $V_k$  – радиальная скорость НКА, определяемая доплеровскими измерениями в  $k$ -й момент времени, с дисперсией  $S_V^2$ .

Если потребитель обладает слабой динамикой, то в течение промежутка времени  $T = 1 \text{ сек}$  можно принять фундаментальную матрицу равной 1. При принятой модели измерения системы матрица измерений  $H = 1$ .

Начальные условия для фильтра Калмана принимаются следующими:

$$D_0^- = \overline{D}_1; \quad P_0^- = S_D, \quad (7)$$

где  $S_D$  – СКО определения псевдодальности в условиях ИВИ [2].

Выражения (8 – 13) реализуют фильтр Калмана, для уточнения величины псевдодальности. При этом поправки к измерениям

$$K_k = P_k^- (P_k^- + S_D^2)^{-1}. \quad (8)$$

Апостериорная оценка псевдодальности и дисперсия исправленной оценки псевдодальности определяются

$$D_k^+ = D_k^- + K_k (\overline{D}_k - D_k^-). \quad (9)$$

$$P_k^+ = (1 - K_k) \cdot P_k^-. \quad (10)$$

Прогноз начальных условий для нового цикла и априорная оценка дальности для следующего момента времени

$$P_{k+1}^- = P_k^+ + S_V^2. \quad (11)$$

$$D_{k+1}^- = D_k^+ + V_k \cdot \Delta t. \quad (12)$$

Уточненная оценка псевдодальности

$$D_m^* = D_m^+. \quad (13)$$

Здесь знак «-» означает априорные оценки; знак «+» – апостериорные оценки;  $k = 1 \dots m$  – цикл фильтра ( $m$  – количество измерений).

Таким образом, алгоритм определения вектора ПВК потребителя при ИВИ и ЧСЗ навигационных сигналов включает в себя последовательное выполнение следующих этапов:

*Этап 1.* Решение навигационной задачи с использованием величин псевдодальностей, измеренных с высокой погрешностью из-за ИВИ. Результатом является искаженный вектор ПВК потребителя  $\underline{q}$ .

*Этап 2.* Определение СКО измерения псевдодальности до НКА, сигнал которого попадает в ОПИ и подвергается ЧСЗ.

*Этап 3.* Оценка значения псевдодальности фильтром Калмана на основании выражений (8–13). Результат – уточненная величина  $D_m^*$ .

*Этап 4.* Повторное решение навигационной задачи с использованием уточненных значений псевдодальности и начальным приближением  $\underline{q}$ . В результате получают искомым вектор координат потребителя  $\underline{q}$  с погрешностью позиционирования  $S_q$ .

Таким образом данный адаптивный алгоритм определения вектора ПВК потребителя позволит снизить негативные воздействия на СРНС, вызванные созданием искусственных ионосферных возмущений.

В то же время возможна ситуация, когда вследствие создания сильных ИВИ будет искажено само навигационное сообщение от ряда НКА. Если избыточность позволяет перейти на другое созвездие НКА, то большой проблемы в этом нет. Но может возникнуть ситуация, когда в зоне видимости потребителя окажется только три «здоровых» НКА. То есть будет наблюдаться дефицит НКА, так как для точных навигационных определений необходимо не менее четырех НКА.

**Решение навигационной задачи при дефиците нка.** Если в зоне видимости потребителя находится только 3 «хороших» НКА, то предлагается вместо четвертого НКА ввести псевдоспутник, условно располагая его в центре Земли. В случае, когда вместо 4-го НКА созвездия используется псевдоспутник в центре Земли, роль дальности до него выполняет геоцентрическая высота точки нахождения потребителя ( $R_3$ ). Тогда вектор измеренных значений псевдодальностей определяется, как

$$D = \left[ \hat{D}_1, \hat{D}_2, \hat{D}_3, R_3 \right]^T \quad (14)$$

Задача определения вектора состояния потребителя по сигналам трех НКА решается только в случае, когда с высокой точностью известна геоцентрическая высота потребителя. Предлагается алгоритм определения геоцентрической высоты потребителя только по сигналам трех НКА без использования дополнительных измерений и систем (высотомер, инерциальная навигационная система, электронные карты и т.д.).

Для этого проведем ряд геометрических построений. Обозначим: НКА №1 –  $A$ ; НКА №2 –  $B$ ; НКА №3 –  $C$ ;  $S$  – точка нахождения потребителя,  $O_3$  – центр Земли. Построим новую декартовую систему координат  $Apnm$  с центром в точке  $A$ . Ось  $n$  направлена на точку  $C$ , ось  $m$  направлена к поверхности Земли перпендикулярно к плоскости треугольника  $ABC$  (рис. 1). Ось  $p$  лежит в плоскости треугольника  $ABC$  и дополняет систему до правой. То есть, треугольник  $ABC$  лежит на координатной плоскости  $nAp$ , а точка  $C$  принадлежит оси  $n$ ;  $AB = a$ ;  $AC = b$ ;  $BC = c$ . Навигационные аппараты имеют следующие координаты: в геоцентрической системе координат –  $O_3 = [0,0,0]$ ;  $A(x_1, y_1, z_1)$ ,  $B(x_2, y_2, z_2)$ ,  $C(x_3, y_3, z_3)$ ; в новой системе  $Apnm$  –  $A(0,0,0)$ ;  $B(p_B, n_B, 0)$ ;  $C(0, n_C, 0)$ .

Переход от системы координат  $O_3XYZ$  к системе  $Apnm$ , для простоты, происходит в два этапа. Сначала строится система координат  $Ap'n'm'$ , где ось  $n'$  совпадает с осью  $n$ , ось  $p'$  перпендикулярна к оси  $n'$  и направлена в сторону точки  $B$ , ось  $m'$  дополняет систему до правой. При этом треугольник  $ABC$  составляет с плоскостью  $p'An'$  неизвестный угол  $\varphi$ .

Легко показать [12, 13], что координаты центра Земли ( $O_3$ ) в системе  $Apnm$  определяются выражениями:

$$\begin{cases} p_{O_3} = -(s_p \cos \varphi + t_p \sin \varphi) \cdot x_1 - (s_n \cos \varphi + t_n \sin \varphi) \cdot y_1 - (s_m \cos \varphi + t_m \sin \varphi) \cdot z_1; \\ n_{O_3} = -k_p \cdot x_1 - k_n \cdot y_1 - k_m \cdot z_1; \\ m_{O_3} = (s_p \sin \varphi - t_p \cos \varphi) \cdot x_1 - (t_n \cos \varphi - s_n \sin \varphi) \cdot y_1 - (t_m \cos \varphi - s_m \sin \varphi) \cdot z_1 \end{cases}, \quad (15)$$

где  $s_p, s_n, s_m, k_p, k_n, k_m, t_p, t_n, t_m$  – направляющие косинусы осей  $p', n'$  и  $m'$  соответственно, определяемые выражениями

$$\begin{cases} k_p = \frac{x_3 - x_1}{b} \\ k_n = \frac{y_3 - y_1}{b} \\ k_m = \frac{z_3 - z_1}{b} \end{cases} \quad \begin{cases} t_p = -\frac{k_n}{\sqrt{k_p^2 + k_n^2}} \\ t_n = \frac{k_p}{\sqrt{k_p^2 + k_n^2}} \\ t_m = 0 \end{cases} \quad \begin{cases} s_p = -k_m \cdot t_n \\ s_n = k_m \cdot t_p \\ s_m = k_p \cdot t_n - k_n \cdot t_p \end{cases} \quad (16)$$

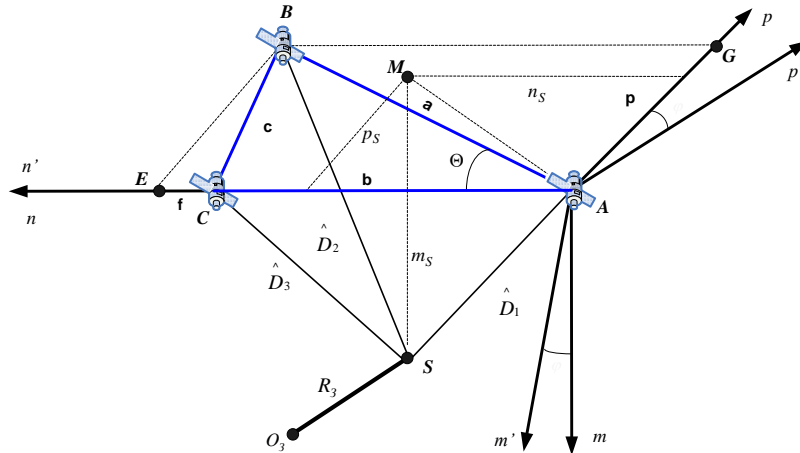


Рис. 1. Геометрическое построение для нахождения радиуса Земли

Угол поворота системы координат определяется выражениями

$$\cos \varphi = \frac{p_2'}{\sqrt{m_2'^2 + p_2'^2}} \quad (17)$$

где 
$$\begin{cases} p_2' = s_p \cdot (x_2 - x_1) + s_n \cdot (y_2 - y_1) + s_m \cdot (z_2 - z_1) \\ m_2' = t_p \cdot (x_2 - x_1) + t_n \cdot (y_2 - y_1) + t_m \cdot (z_2 - z_1) \end{cases}$$

Далее решается задача нахождения координат точки  $S = [p_s, n_s, m_s]$ . Для этого необходимо из точки  $S$  опустить перпендикуляр  $SM$  на плоскость  $nAp$  (рис. 1). Длина отрезка  $SM$  равна величине  $m_s$ , координаты точки  $M$  по осям  $n$  и  $p$  равны координатам  $n_s$  и  $p_s$  соответственно. Обозначим отрезки:  $AE$  – как  $f = a \cdot \cos \Theta$ ;  $AG$  – как  $p = a \cdot \sin \Theta$ . Тогда

$$n_s = \frac{\hat{D}_1^2 - \hat{D}_3^2 + b^2}{2 \cdot b}; \quad p_s = \frac{a^2 - 2 \cdot f \cdot n_s - \hat{D}_2^2 + \hat{D}_1^2}{2 \cdot p}; \quad m_s = \sqrt{\hat{D}_1^2 - p_s^2 - n_s^2} \quad (18)$$

Далее определяется геоцентрическая высота в точке  $S$ :

$$R_3 = \sqrt{(p_s - p_{O_3})^2 + (n_s - n_{O_3})^2 + (m_s - m_{O_3})^2} \quad (19)$$



Согласно (18) координата  $m_s$  может иметь как отрицательное, так и положительное значение. Величина  $m_s$  принимает отрицательное значение в случаях, когда в выбранной тройке НКА два аппарата имеют низкие ( $5^0 \dots 7^0$ ) углы места. Возникающую неоднозначность можно устранить сравнением полученной величины  $R_z$  с величиной большой полуоси земного эллипсоида  $a_3 = 6378136 \text{ м}$ .

Определив величину  $R_z$  далее решают навигационную задачу известным итерационным методом наименьших квадратов, где вектор измеренных значений псевдодальностей имеет вид (14).

**Выводы.** В работе представлена технология, включающая в себя алгоритм обнаружения ОПИ и модификацию алгоритма вторичной обработки навигационных данных, применение которой позволяет повысить информационную защищенность СРНС в случае создания сильных ионосферных возмущений. Следует заметить, что данная технология применима только к слабодинамичным объектам, так как требует отказа от одномоментных измерений. Очевидно, что количество вычислений при этом возрастает в несколько раз, в сравнении с обычной схемой решения навигационной задачи. Повысить число таких вычислений без существенной потери времени возможно за счет перехода к параллельным системам счисления, в частности системе остаточных классов [14]. Применение модифицированной навигационной аппаратуры потребителей, в которой будет реализована представленная технология, позволит исключить высокую погрешность местопредопределения, вызванную намеренным искусственным воздействием на ионосферу.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Котляшкин С.И.* Определение ионосферной задержки сигналов в одночастотной аппаратуре потребителей спутниковой системы навигации NAVSTAR. // Зарубежная радиоэлектроника. – 1989. – № 5. – С. 85-95.
2. *Пашищев В.П., Катков К.А., Гахов Р.П. и др.* Спутниковая навигация при ионосферных возмущениях: Монография. – Ставрополь: СевКавГТУ, 2012. – 259 с.
3. *Катков К.А., Гахова Н.Н.* Алгоритм определения наличия областей повышенной ионизации в ионосфере // Научные технологии. – 2012. – Т. 13, № 7. – С. 8-15.
4. *Пашищев В.П., Солчатов М.Э., Спиринов А.М., Катков К.А.* Оценка погрешности измерения псевдодальности в спутниковых радионавигационных системах при возмущениях ионосферы в слое F // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. – 2007. – Т. 10, № 6. – С. 8-13.
5. *Пашищев В.П., Солчатов М.Э., Гахов Р.П.* Влияние ионосферы на характеристики космических систем передачи информации: Монография. – М.: Физматлит, 2006. – 184 с.
6. *Богущи Р.Л., Гильяно Ф.У., Ненн Д.Л.* Влияние частотно-селективных эффектов распространения радиоволн на автоматическое слежение за сигналом в приемниках широкополосных систем связи // ТИИЭР. – 1981. – Т. 69, № 7. – С. 21-32.
7. *Богущи Р.Л., Джульяно Ф.У., Ненн Д.Л.* Частотно-селективные замирания и их коррекция методом решающей обратной связи в высокоскоростных спутниковых каналах связи // ТИИЭР. – 1983. – Т. 71, № 6. – С. 78-94.
8. *Gordon W.E., Carlson H.S.* Arebico heating experiments. // Radio Science. – 1974. – Vol. 9, № 11. – P. 43-61.
9. *Афраймович Э.Л., Первалова Н.П.* GPS-мониторинг верхней атмосферы Земли. – Иркутск: ГУ НЦ РВХ ВСНЦ СО РАМН, 2006. – 480 с.
10. *Катков К.А.* Совершенствование навигационной аппаратуры потребителей спутниковых радионавигационных систем для использования в условиях искусственных возмущений ионосферы // Известия ОрелГТУ. Информационные системы и технологии. – 2011. – № 1 (63). – С. 5-14.
11. *Katkov K.A., Kalmykov I.A.* Application of Parallel Technologies in Navigation Management under the Conditions of Artificial Ionospheric Disturbances // World Applied Sciences Journal. – 2013. – № 26 (1). – P. 108-113 URL DOI: 10.5829/idosi.wasj.2013.26.01.13467.

12. Катков К.А., Скорынина С.А., Окулова М.С. Использование псевдоспутника в центре Земли в спутниковых радионавигационных системах // Двойные технологии. – 2009. – № 4. – С. 56-63.
13. Катков К.А. Анализ погрешности позиционирования в спутниковых радионавигационных системах при вводе в решение навигационной задачи псевдоспутника, расположенного в центре Земли // Вестник компьютерных и информационных технологий. – 2009. – № 10. – С. 5-15.
14. Калмыков И.А., Зиновьев А.В., Емарлукова Я.В. Высокоскоростные систолические отказоустойчивые процессоры цифровой обработки сигналов для инфотелекоммуникационных систем // Инфокоммуникационные технологии. – 2009. – Т. 7, № 2. – С. 31-47.

Статью рекомендовал к опубликованию к.т.н. Д.В. Шлаев.

**Катков Константин Александрович** – Северо-Кавказский федеральный университет; e-mail: kkatkoff@mail.ru; 355047 г. Ставрополь ул. Макарова, 8/2, кв. 48; тел.: 89188619802; кафедра информатики; зав. кафедрой; к.т.н.; доцент.

**Катков Евгений Константинович** – e-mail: kep26rus@mail.ru; тел.: 89187565839; студент.

**Katkov Konstantin Aleksandrovich** – North-Caucasian Federal University; e-mail: kkatkoff@mail.ru; 8/2, Makarov street, fl. 48, Stavropol, 355047, Russia; phone: +79188619802; the department of informatics; head of department; cand. of eng. sc.; associate professor.

**Katkov Eugene Konstantinovich** – e-mail: kep26rus@mail.ru; phone: +79187565839; student.