

Комаровский Ю. А.

05.13.01

Yu. A. Komarovsky

**ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ
ОПРЕДЕЛЕНИЯ КООРДИНАТ
ДОПЛЕРОВСКИМИ СПУТНИКОВЫМИ
НАВИГАЦИОННЫМИ СИСТЕМАМИ
IMPROVING THE ACCURACY OF THE
MEASUREMENT OF COORDINATES
OBTAINED USING DOPPLER SATELLITE
NAVIGATION SYSTEM**



Комаровский Юрий Александрович — кандидат технических наук, старший научный сотрудник кафедры теории и устройства судна Морского государственного университета им. адм. Г.И. Невельского (г. Владивосток). E-mail: Komarovskiy@msun.ru.

Yuriy A. Komarovsky — PhD in Engineering, Senior Researcher at the Department of Ship Theory and Naval Architecture of Admiral G. I. Nevelsky State Maritime University (city of Vladivostok) E-mail: Komarovskiy@msun.ru.

Аннотация: Обнаружено присутствие суточной составляющей погрешности координат, определяемых доплеровской спутниковой навигационной системой. Предложен способ устранения этой погрешности и оценена эффективность этого способа.

Summary: We have discovered a 24-hour error component in the measurements of coordinates obtained using a Doppler satellite navigation system. For this error component, we suggest an error correction method with estimation of its efficiency.

Ключевые слова: КОСПАС-САРСАТ, Транзит, систематическая погрешность.

Keywords: KOSPAS-SARSAT, Transit, systematic error.

Главную роль в обеспечении безопасности судов и самолётов, их экипажей и пассажиров выполняет международная спутниковая система поиска и спасения КОСПАС-САРСАТ. В системе КОСПАС-САРСАТ определение координат аварийного радиобуя (АРБ) происходит доплеровским способом. Чтобы сократить время поиска терпящих бедствие, необходимо вычис-

лять с высокой точностью координаты активированного АРБ. Данная статья предлагает один из способов повышения точности за счёт компенсации систематических погрешностей, возникающих вследствие суточного хода параметров земной ионосферы.

Из-за относительной скорости v_r перемещения искусственного спутника Земли (ИСЗ) по отношению к АБР всегда имеет место отличие излучаемой частоты радиосигнала АБР f_0 от принимаемой спутником частоты f_s . Это отличие выражается доплеровским смещением частоты F_D ,

$$F_D = f_s - f_0, \quad F_D = -f_0 \frac{v_r(t)}{c} = -\frac{1}{\lambda} v_r(t), \quad (1)$$

где c – скорость распространения электромагнитных колебаний на трассе АБР – ИСЗ, λ – длина излучаемой АБР радиоволны.

Относительная скорость сближения $v_r(t)$ является первой производной по времени модуля радиус-вектора с началом в точке расположения АБР, то есть

$$v_r(t) = \dot{r}(t). \quad (2)$$

Понятно, что в момент кульминации спутника относительно АБР

$$v_r(t) = 0, \quad F_D = 0, \quad \dot{r}(t) = 0.$$

Если интегрировать доплеровское смещение частоты на интервале времени от t_1 до t_2 , то согласно (1) и (2) получим

$$\int_{t_1}^{t_2} F_D(t) dt = -\frac{1}{\lambda} \int_{t_1}^{t_2} \dot{r}(t) dt.$$

Интеграл от радиальной составляющей скорости даёт разность расстояний между положениями спутника системы КОСПАС-САРСАТ и АБР в моменты времени t_1 и t_2 . Отсюда

$$\int_{t_1}^{t_2} F_D(t) dt = -\frac{1}{\lambda} |r_2 - r_1| = -\frac{1}{\lambda} \Delta r,$$

где r_1 и r_2 – значения модуля радиус-вектора в моменты времени t_1 и t_2 соответственно.

Координаты спутника в пространстве всегда известны на моменты времени t_1 и t_2 . Считается, что координаты АБР не меняются. Тогда, проинтегрировав $F_D(t)$ на интервале от t_1 до t_2 , получим величину, функционально связанную с разностью расстояний между АБР и спутником системы КОСПАС-САРСАТ в моменты времени t_1 и t_2 . Этому будет соответствовать поверхность гиперboloида, в фокусе которого расположен спутник. Каждая точка поверхности гиперboloида будет отвечать постоянству разности расстояний Δr . В момент кульминации спутника гиперboloид вырождается в плоскость, проходящую через спутник и АБР, перпендикулярно вектору линейной скорости спутника.

След от пересечения поверхности гиперboloида

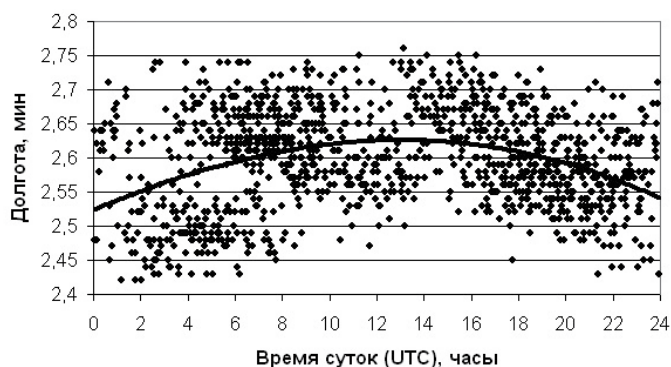
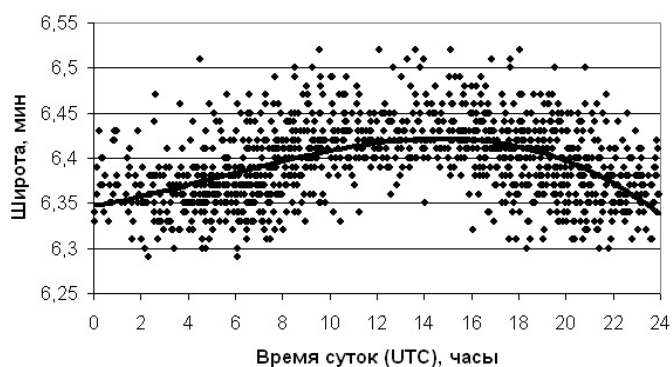


Рис. 1. Суточный ход обсервованных широт (левая панель) и долгот (правая панель)

с поверхностью земного эллипсоида представляет собой навигационную изолинию, проходящую через точку, в которой находится активированный АБР. Выполнив несколько последовательных измерений $FD(t)$ на интервалах времени одинаковой длительности, получим на поверхности Земли две точки пересечения навигационных изолиний. Они будут расположены симметрично относительно трассы подспутниковой точки на поверхности Земли. В одной из этих точек находится АБР. Подобную двужначность в доплеровских навигационных системах разрешают с учётом вращения Земли [3].

Описанный способ определения координат АБР принято называть интегрально-доплеровским, или разностно-дальномерным. Его точность зависит от многих факторов, из которых доминирующим является угол кульминации спутника системы КОСПАС-САРСАТ. При малых углах кульминации (менее 5°) погрешность определения широты активированного АБР может достигать 15 км [3].

Кроме того, на точность определения координат терпящих бедствие оказывает влияние состояние трансионосферного канала распространения радиосигнала от АБР к спутнику. Возникающие в ионосфере флуктуации плотности заряженных частиц вызывают замирания радиосигналов, а также мерцания амплитуды, частоты и фазы принимаемого радиосигнала. Замирания и мерцания амплитуды приводят к нарушениям непрерывности измерения $FD(t)$, то есть, к потерям навигационных изолиний. При прохождении радиоволн через ионосферу наблюдаются изменения их частоты и фазы [1]. Подобные изменения приводят к погрешностям измерения $FD(t)$, а следовательно, к случайным и систематическим смещениям навигационных изолиний. Отмечены систематические изменения фазы радиосигнала, имеющие ярко выраженный суточный ход. Максимум отклонений фазы приходится на полдень местного времени [1]. Отсюда можно сделать предположение о присутствии случайных и систематических погрешностей в координатах АБР.

К сожалению, исследования влияния суточных изменений параметров ионосферы на точность определения координат терпящих бедствия в системе КОСПАС-САРСАТ не проводились из-за невозможности постановки широкомасштабных экспериментов. Чтобы восполнить этот пробел, был проанализирован статистический материал, полученный автором с 1987 по 1979 г. в ходе непрерывных наблюдений за работой судового приёмника FSN-70 спутниковой радионавигационной системы (СРНС) Транзит. Техни-

ческие характеристики СРНС Транзит близки к техническим характеристикам системы КОСПАС-САРСАТ. Отличие заключается в том, что в системе КОСПАС-САРСАТ координаты определяются на спутнике или на береговой станции, а в СРНС Транзит – на судне.

Для данного исследования были отобраны наблюдения с 1 декабря 1987 года по 31 января 1988 года. Этот период был выбран из-за малого изменения моментов времени восхода-захода Солнца. Наблюдения проводились в лаборатории кафедры Промышленного судовождения и промышленного рыболовства Дальневосточного филиала Всесоюзного института повышения квалификации руководящих работников и специалистов рыбного хозяйства СССР во Владивостоке. Приёмник FSN-70 в этот период работал непрерывно круглые сутки. Результаты каждой обсервации выводились принтером приёмника на металлизированную бумажную ленту. Моменты обсервации по шкале Универсального координированного времени (UTC), координаты, номер спутника и признак качества обсервации переносились в бумажные протоколы. Затем эти данные были оцифрованы. Из массива данных были удалены координаты, соответствующие малым углам кульминации, и оставлены только те, которые сопровождалось признаком "OK". Таким образом, для дальнейших исследований было отобрано 1189 обсерваций приёмника FSN-70. Обсервованные широты и долготы распределились по времени суток так, как это показано на рис. 1.

На рис. 1 прослеживается нелинейная зависимость широт и долгот от времени суток по шкале UTC. Видно, что отклонения трендов широт и долгот имеют один максимум и один минимум. Видно, что линии трендов имеют асимметрию относительно 12 часов UTC. В распределении обсервованных широт (см. левую панель рис. 1) асимметрия выражена гораздо больше по сравнению с суточным распределением обсервованных долгот.

Для облегчения анализа на рисунки нанесены графики регрессионных полиномиальных степенных зависимостей вида

$$y = a_0 + a_1t + a_2t^2 + a_3t^3, \quad (3)$$

где $a_0 - a_3$ – коэффициенты, величины которых были рассчитаны методом наименьших квадратов; t – время в часах суток по шкале UTC.

В результате вычислений были получены следующие регрессионные выражения:

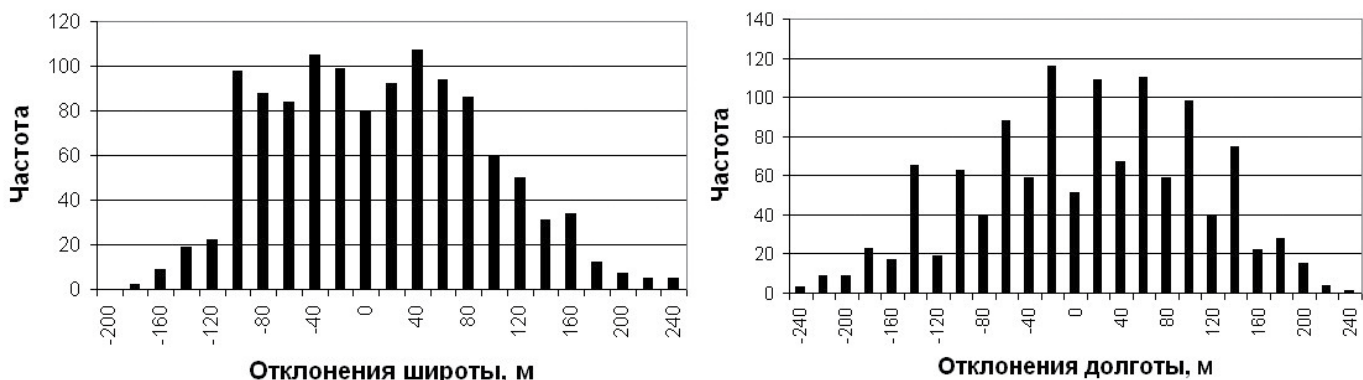


Рис. 2. Гистограммы отклонений широты (левая панель) и долготы

$$\begin{cases} \bar{\varphi}(t) = 6,34703 + 0,004511t + 0,000421t^2 - 0,000026t^3 \\ \bar{\lambda}(t) = 2,523298 + 0,015022t - 0,000492t^2 - 0,000004t^3 \end{cases} \quad (4)$$

где $\bar{\varphi}(t)$ и $\bar{\lambda}(t)$ – значения трендов широты и долготы соответственно, выраженные в угловых минутах.

Размах варьирования в метрах суточных трендов широты $\Delta\bar{\varphi}$ и долготы $\Delta\bar{\lambda}$ рассчитывались следующим образом:

$$\Delta\bar{\varphi} = (\bar{\varphi}(t)_{\max} - \bar{\varphi}(t)_{\min}) \times l_m, \quad \Delta\bar{\lambda} = (\bar{\lambda}(t)_{\max} - \bar{\lambda}(t)_{\min}) \times l_p,$$

где $\Delta\bar{\varphi}(t)_{\max}$ и $\Delta\bar{\lambda}(t)_{\max}$ – наибольшие значения суточных трендов широты и долготы соответственно, выраженные в угловых минутах; $\Delta\bar{\varphi}(t)_{\min}$ и $\Delta\bar{\lambda}(t)_{\min}$ – наименьшие значения суточных трендов широты и долготы соответственно, выраженные в угловых минутах; l_m и l_p – длины дуг одной минуты меридиана и параллели соответственно, выраженные в метрах;

$$l_m = \frac{a(1-e^2)\text{arc}1'}{\sqrt{(1-e^2 \sin^2 \varphi_{cp})^3}}, \quad l_p = \left(\frac{a}{\sqrt{1-e^2 \sin^2 \varphi_{cp}}} \text{arc}1' \right) \cos \varphi_{cp},$$

где a – большая полуось референц-эллипсоида WGS-84, e – его первый эксцентриситет, φ_{cp} – средняя широта в градусах, которая была получена в работе [2].

В результате вычислений суточный размах варьирования тренда широты составил 175,9 м, а суточный размах варьирования тренда долготы получился равным 138,4 м. Полученные величины являются размерами интервалов, внутри которых происходит суточное изменение систематических погрешностей наблюдаемых широт и долгот АБР.

Чтобы оценить величины случайных погрешностей и характер распределения наблюдаемых широт и долгот, были рассчитаны средние, средние квадратические отклонения (СКО), асимметрии, эксцессы и размахи варьирования исходных массивов наблюдений. Результаты вычислений сведены в табл. 1.

Таблица 1

Параметры распределений координат исходного массива

Параметр распределения	Широта	Долгота
Среднее, мин	6,3942	2,5974
Среднее квадратическое отклонение, мин	0,04319	0,07241
Среднее квадратическое отклонение, м	79,97	98,22
Асимметрия	0,204	-0,176
Эксцесс	-0,291	-0,629
Размах варьирования, м	425,9	461,2

Анализ табл. 1 позволяет сделать следующие выводы:

При углах кульминации спутника более 5° рассеивание широты меньше рассеивания долготы. Размахи варьирования координат не превышают 500 м. Это расстояние даже для моря нельзя признать достаточным при визуальном мониторинге предполагаемого места крушения. Как правило, аварии с судами и самолётами происходят в условиях, вызывающих значительное снижение вертикальной и горизонтальной дальности видимости (дождь, туман, морось, снежные заряды, пыльные бури, дым). Поэтому возникает необходимость повышения точности наблюдаемых координат, определяемых системой КОСПАС-САРСАТ.

Другими важными характеристиками распределения погрешностей наблюдаемых координат служат их гистограммы распределения. На рис. 2 представлены гистограммы распределения центрированных величин наблюдаемых широт и долгот исходного массива.

На рис. 2 видно, что в распределении наблюдаемых долгот прослеживается унимодальность, чего нет в распределении широт.

Так как размахи варьирования систематических погрешностей превосходят СКО, то для повышения точности определения координат АБР целесообразно удалять из наблюдаемых координат суточный тренд.

Рассчитаем средние значения суточных трендов широты $\bar{\varphi}_{cp}$ и долготы $\bar{\lambda}_{cp}$.

$$\bar{\varphi}_{cp} = \frac{1}{N} \left[\sum_{i=1}^N \bar{\varphi}(t_i) \right], \quad \bar{\lambda}_{cp} = \frac{1}{N} \left[\sum_{i=1}^N \bar{\lambda}(t_i) \right], \quad (5)$$

где $\bar{\varphi}(t_i)$ и $\bar{\lambda}(t_i)$ – значение регрессионной модели (4) для моментов времени, в которые были выполнены наблюдения в исходном массиве; N – число наблюдений в исходном массиве наблюдений.

Если модель (4) использовать для вычисления поправок к наблюдаемым координатам, то средние квадратические отклонения наблюдаемых координат σ_φ , σ_λ от трендов, то есть СКО исправленного массива, рассчитаются по следующим формулам:

$$\sigma_\varphi = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N [\varphi_i - \bar{\varphi}(t_i)]^2}{N}}, \quad \sigma_\lambda = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N [\lambda_i - \bar{\lambda}(t_i)]^2}{N}},$$

где φ_i и λ_i – наблюдаемые широта и долгота соответственно исходного массива, угловые минуты.

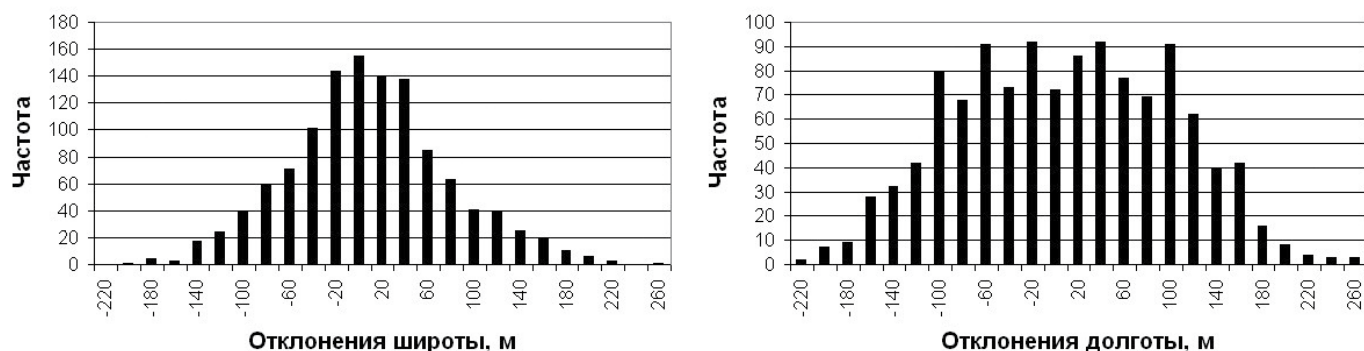


Рис. 3. Гистограммы отклонений исправленных широт (левая панель) и долгот

После устранения суточной погрешности из координат исходного массива рассчитанные параметры исправленного распределения координат сведены в табл. 2.

Таблица 2
Параметры распределений координат исправленного массива

Параметр распределения	Широта	Долгота
Среднее, мин	6,3945	2,5986
Среднее квадратическое отклонение, мин	0,03759	0,06838
Среднее квадратическое отклонение, м	69,61	92,75
Асимметрия	0,192	0,021
Экссесс	0,212	-0,7
Размах варьирования, м	458,3	471,4

Результат удаления суточных трендов можно оценить, сравнивая табл. 1 и 2. Видно, что средние значения исходного массива и исправленного массива отличаются незначительно. Уменьшилось на 10,36 м (12,9 %) СКО широты и уменьшилось на 5,47 м (5,5 %) СКО долготы. Следует отметить существенное изменение эксцесса широты и увеличение размахов варьирования исправленных координат.

О точности предложенной модели (4) можно судить по невязкам. Средняя невязка по широте составила величину -0,4877 м, по долготе она равна -1,5688 м. Этот факт подтверждает большую вариабельность обсервованной долготы по сравнению с обсервованной широтой.

На рис. 3 представлены гистограммы распределения широт и долгот после исправления исходного массива наблюдений.

Сравнение гистограмм рис. 2 и 3 позволяет сделать вывод о том, что устранение суточной составляющей существенно изменяет вид функций распределения случайных величин широт и долгот.

В заключение следует остановиться на формировании общей поправки к текущим координатам АБР. Пусть аварийный буй транслирует сигналы бедствия из точки с известными с высокой точностью координатами φ_0 и λ_0 . Обозначим через $\Delta\varphi$ и $\Delta\lambda$ постоянные погрешности, обязательно присутствующие в измерениях координат. Причина их возникновения кроется в несовершенстве алгоритма вычислений. Понятно, что $\Delta\varphi$ и $\Delta\lambda$ не зависят от времени суток. Численно $\Delta\varphi$ и $\Delta\lambda$ будут равны средним значениям суточных трендов широты $\bar{\varphi}_{ср}$ и долготы $\bar{\lambda}_{ср}$ (5) при $N \rightarrow \infty$. Тогда $\Delta\varphi = \bar{\varphi}_{ср} - \varphi_0$, $\Delta\lambda = \bar{\lambda}_{ср} - \lambda_0$.

Обозначим через $\varepsilon\varphi$ и $\varepsilon\lambda$ случайные погрешности измерений широты и долготы соответственно. Наделим их следующими свойствами: математические

ожидания $\varepsilon\varphi$ и $\varepsilon\lambda$ равны нулю, их дисперсии конечны, корреляционный момент двух реализаций случайной величины, полученных в разные моменты времени, равен нулю.

Детерминированные составляющие погрешности обсервованных в данное время суток координат будут равны суммам $\Delta\varphi + \bar{\varphi}(\varepsilon)$, $\Delta\lambda + \bar{\lambda}(\varepsilon)$. Взятые с обратным знаком эти суммы будут поправками. Таким образом, если измеренные координаты исправить поправками, то исправленные будут содержать только случайные погрешности.

Подводя итог, можно сделать следующие выводы и предложения.

1. Обнаружена суточная составляющая погрешностей в координатах АБР и предложена её регрессионная модель.
2. Предложен способ определения постоянной погрешности координат аварийного радиобуя.
3. Показано, что удаление суточной составляющей модифицирует функции распределения случайных погрешностей координат АБР.
4. Полученные параметры функций распределений могут послужить в деле организации процедур поиска и спасения терпящих бедствие.
5. Предложен способ повышения точности определения координат терпящих бедствие.
6. Необходимо продолжить исследования с целью оценки сезонных изменений обсервованных координат, получаемых с помощью доплеровских спутниковых навигационных систем.
7. Следует проанализировать распределение обсервованных координат при малых углах кульминации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дэвис, К. Радиоволны в ионосфере / К. Дэвис. - М.: Мир, 1973. - 502 с.
2. Комаровский Ю. А. Зависимость точности обсервованных координат ПИ FSN 70 от высоты кульминации спутников СРНС Транзит / Ю. А. Комаровский // Вестник Морского государственного университета. Вып. 22/2008. Серия: История морской науки, техники и образования. – Владивосток: Мор. гос. ун-т, 2008. - С. 105 -116.
3. Международная космическая радиотехническая система обнаружения терпящих бедствие / А. И. Балашов [и др.]; под ред. В. С. Шибшаевича. - М.: Радио и связь, 1987. - 376 с.