

**Комаровский Ю. А.**  
**Yu. A. Komarovskiy**

### **ТОЧНОСТЬ ДОПЛЕРОВСКОЙ НАВИГАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ ПРИ БОЛЬШИХ УГЛАХ КУЛЬМИНАЦИИ СПУТНИКОВ**

### **ACCURACY OF A DOPPLER NAVIGATION SYSTEM FOR LARGE ANGLES OF SA- TELLITE CULMINATION**



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

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

**Аннотация.** Погрешности координат, получаемых с помощью спутниковых навигационных систем доплеровского типа, сильно зависят от максимальной высоты прохождения спутника над горизонтом. На примере системы Транзит показано, что при углах кульминации спутника от  $75^\circ$  до  $89^\circ$  получаемая широта рассеивается на 2 км, а долгота – на 20 км. Когда спутник проходит через зенит, определение координат становится невозможным.

**Summary.** Errors in coordinates obtained using Doppler-type satellite navigation systems are largely dependent on the satellite's maximum altitude above the horizon. Using an example of the system called Transit we have shown that, for coordinates obtained with angles of satellite culmination ranging between  $75$  and  $89$  degrees, deviation of the latitude and longitude is 2 and 20 kilometers, respectively. When a satellite reaches the zenith, obtaining of coordinates becomes impossible.

**Ключевые слова:** КОСПАС-САРСАТ, Транзит, точность, систематическая погрешность, случайная погрешность.

**Key words:** COSPAS-SARSAT, Transit, accuracy, systematic error, random error.

УДК 621.396.932.1:629.783

Глобальная международная спутниковая система КОСПАС-САРСАТ (COSPAS-SARSAT) предназначена для оповещения о бедствии и определения координат активированных аварийных радиобуёв (АРБ). Космический сегмент системы включает в себя шесть низкоорбитальных спутников на высотах около 1000 км, обращающихся вокруг Земли с периодом 100 мин, и пять геостационарных спутников, выполняющих функции ретрансляторов. Подвижные спутники имеют полярные орбиты, плоскости которых наклонены под углом  $83^\circ$  к плоскости экватора Земли. Низкоорбитальные спутники предназначены для приёма сигналов бедствия и определения координат АРБ по доплеровским сдвигам частоты его несущих колебаний в полосе от 406 до 406,1 МГц. Эта информация передаётся на геостационарные спутники, которые ретранслируют её на наземные пункты инфраструктуры системы КОСПАС-САРСАТ. С начала функционирования системы (с 1 сентября 1982 г.) по декабрь 2008 г. при использовании системы КОСПАС-САРСАТ было спасено 26779 чел.

Успех операций по поиску и спасению людей, попавших в аварию, во многом зависит от точности определения места буя (ОМБ). Дело в том, что подвижные спутники не всегда



находятся в зоне радиовидимости АРБ из-за своего движения вдоль меридиана. Существует периодичность пролётов спутников для того или иного места на поверхности Земли. В низких широтах период между прохождением спутников может достигать полутора часов. Для терпящих бедствия в высоких широтах, в которых природно-климатические условия более суровы, период между смежными прохождением спутников системы КОСПАС-САРСАТ становится менее часа. Как показано в работах [1; 2], на точность определения координат доплеровскими радионавигационными системами оказывают влияние целый ряд факторов. Среди них доминирующим выступает угол, при котором спутник кульминирует относительно места, в котором находится АРБ. В данной статье исследуется то, как угол кульминации, лежащий в пределах от  $75^\circ$  до  $90^\circ$ , влияет на точность определения широты и долготы АРБ.

В ОМБ при больших углах кульминации спутника системы КОСПАС-САРСАТ есть свои особенности. Они вытекают из характера видимого движения ИСЗ относительно АРБ. При больших углах кульминации трасса подспутниковой точки проходит в меридиональном направлении в непосредственной близости от места, в котором находится АРБ. В такой ситуации время нахождения буя в зоне радиовидимости спутника будет максимально. Это делает весьма надёжным приём спутником сигнала бедствия, поступающего от АРБ. Однако в реальности для ОМБ такая ситуация приводит к ухудшению точности.

На первый взгляд, увеличение времени нахождения АРБ в зоне радиовидимости спутника должно вызывать рост интервалов интегрирования доплеровских сдвигов частоты. Каждому такому интервалу соответствует одна навигационная изолиния. Пересечение изолиний на поверхности Земли приводит к ОМБ. Следовательно, при больших углах кульминации точность ОМБ должна быть максимальной.

Чтобы разрешить это противоречие, воспользуемся статистическими данными, накопленными в ходе экспериментальных наблюдений за работой приёмника FSN-70 доплеровской спутниковой радионавигационной системы Транзит (Transit). По своим техническим характеристикам системы Транзит и КОСПАС-САРСАТ близки. Принципиальное отличие между ними заключается в том, что в системе КОСПАС-САРСАТ координаты буя определяются спутником, а в системе Транзит – судовым приёмником. Наблюдения проводились с октября 1987 г. по март 1989 г. в лаборатории радионавигационных приборов Всесоюзного института повышения квалификации руководящих работников и специалистов рыбного хозяйства СССР во Владивостоке. Приёмник FSN-70, изготовленный японской компанией Fujihiro, определял обсервованные координаты, соответствующее им время на Гринвиче, высоту кульминации спутника, количество интервалов интегрирования доплеровских сдвигов частоты, а также признак, по которому штурман мог судить о точности данной обсервации. Как показали результаты предварительной обработки полученных данных, при больших углах кульминации количество принятых для обсервации интервалов интегрирования становится незначительным [3]. При угле кульминации  $12^\circ$  число принятых интервалов интегрирования (число изолиний) достигает 27, а при угле кульминации в  $89^\circ$  их число не превышает 7-10. Более того, практически все обсервации при углах кульминации спутников от  $75^\circ$  до  $90^\circ$  имели признак, по которому полученные координаты нельзя использовать в судовождении вследствие их низкой точности. Поэтому в работе [1] этот диапазон углов кульминации не исследовался. Для анализа работы системы КОСПАС-САРСАТ любой диапазон углов кульминации важен в одинаковой степени, так как здесь затрагивается проблема безопасности в чрезвычайных ситуациях.

В рамках данного исследования первоначальная обработка 12216 накопленных наблюдений свелась к получению гистограммы распределения числа наблюдений в зависимости от угла кульминации спутника. Эта гистограмма представлена на рис. 1.

На рис. 1 можно видеть, как, начиная с угла кульминации  $20^\circ$ , число наблюдений монотонно убывает, достигая минимальных значений в области больших высот спутника над горизонтом. Убывание числа наблюдений имеет своё объяснение. Причина кроется в характере изменения азимута спутника. При большом угле кульминации азимут спутника со стороны буя изменяется медленно до момента и после момента кульминации. Это приводит к тому, что смежные изолинии пересекаются под малыми углами между собой. Интервалы интегрирования, соответствующие этим изолиниям, отбрасываются и в расчётах координат буя не участвуют. Таким образом, наблюдения, сопровождающиеся прохождением спутника на больших высотах над горизонтом, выполняются при малом числе изолиний. Такие изолинии пересекают параллель АРБ под меньшими углами, нежели меридиан. Следовательно, такие наблюдения будут характеризоваться низкой точностью, а их фигура погрешности должна быть вытянута вдоль параллели. Когда спутник проходит через зенит (угол кульминации равен  $90^\circ$ ), то до момента кульминации и после него азимут не изменяется вовсе. Только в момент кульминации азимут в течение нескольких секунд изменится на  $180^\circ$ . Поэтому при прохождении спутника через зенит наблюдения не может быть, и это подтверждается числом наблюдений, равным 0, на рис. 1.



Рис. 1. Распределение относительных частот числа наблюдений

Всего при больших углах кульминации (от  $75^\circ$  до  $90^\circ$ ) было зарегистрировано 957 наблюдений, что составило 7,834 % от общего их числа. Более точное представление о распределении количества наблюдений можно получить при анализе табл. 1.

Таблица 1

Число наблюдений при больших углах кульминации спутника

<b>Угол кульминации</b>	<b>75</b>	<b>76</b>	<b>77</b>	<b>78</b>	<b>79</b>	<b>80</b>	<b>81</b>	<b>82</b>
Число наблюдений	56	82	64	77	77	77	73	72
Процент наблюдений	0,458	0,671	0,524	0,631	0,631	0,631	0,597	0,589
<b>Угол кульминации</b>	<b>83</b>	<b>84</b>	<b>85</b>	<b>86</b>	<b>87</b>	<b>88</b>	<b>89</b>	<b>90</b>
Число наблюдений	59	46	71	74	54	36	39	0
Процент наблюдений	0,483	0,377	0,581	0,606	0,442	0,295	0,319	0

Чтобы оценить величины систематических погрешностей обсервованных широт и долгот, были рассчитаны для каждого угла кульминации  $j$  средние значения широт и долгот  $\varphi_{срj}$  и  $\lambda_{срj}$ :

$$\varphi_{срj} = \frac{1}{n_j} \sum_{i=1}^{n_j} \varphi_{ij}, \quad \lambda_{срj} = \frac{1}{n_j} \sum_{i=1}^{n_j} \lambda_{ij}, \quad (1)$$

где  $n_j$  – число обсерваций при угле кульминации  $j$  (см. табл. 1);  $\varphi_{ij}$  и  $\lambda_{ij}$  – широты и долготы в угловой мере соответственно, зарегистрированные при угле кульминации  $j$ .

На рис. 2 можно видеть отклонения полученных средних значений широт (левая панель) и средних долгот от действительных координат антенны приёмника FSN-70 в системе WGS-84, определённых высокоточным геодезическим способом. Величины действительных координат показаны пунктирными линиями.

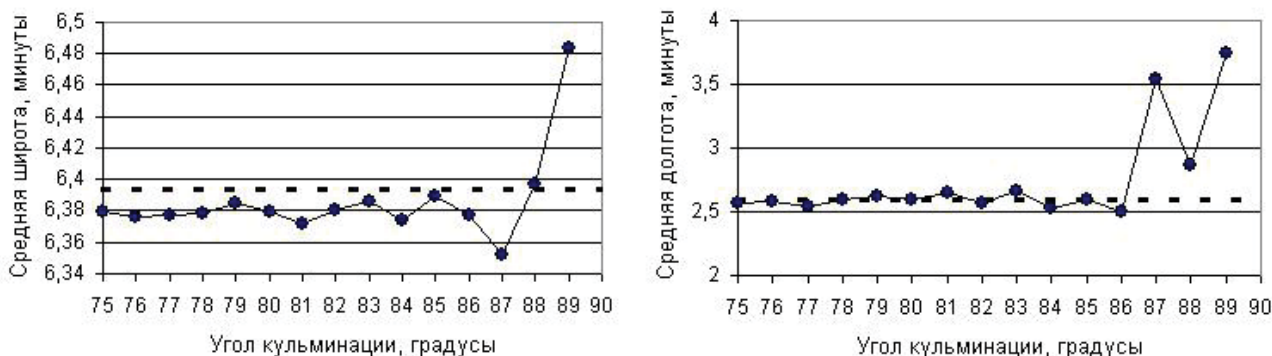


Рис. 2. Систематические погрешности широт (слева) и долгот

На левой панели рис. 2 прослеживается явное присутствие систематической погрешности обсервованной широты. Видно, что до угла кульминации  $86^\circ$  средние значения обсервованных широт устойчиво в среднем на 27,7 м располагаются к югу от действительной широты. После угла кульминации  $86^\circ$  средние обсервованные широты значительно отклоняются к северу. Приблизительно также изменяются средние долготы. Только их величины в среднем отклоняются на 16,3 м к западу. При углах кульминации  $87^\circ$  и более средняя долгота имеет тенденцию существенного ухода к востоку.

Практическое значение для организации поиска и спасения имеют величины случайных погрешностей определения обсервованных координат при больших углах кульминации спутника. Статистической оценкой случайных погрешностей принято считать среднее квадратическое отклонение (СКО). Величины в метрах СКО обсервованных широт  $\sigma_{\varphi_j}$  и долгот  $\sigma_{\lambda_j}$  для каждого значения угла кульминации  $j$  рассчитывались по следующим формулам:

$$\sigma_{\varphi_j} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n_j} (\varphi_{ij} - \varphi_{срj})^2}{n_j}} \times l_m, \quad \sigma_{\lambda_j} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n_j} (\lambda_{ij} - \lambda_{срj})^2}{n_j}} \times l_p, \quad (2)$$

где  $l_m$  и  $l_p$  – длины в метрах одной минуты меридиана и одной минуты параллели референц-эллипсоида WGS-84 соответственно; остальные переменные соответствуют переменным формулы (1).

Величины  $l_m$  и  $l_p$  зависят от широты места, в котором выполнялись экспериментальные наблюдения. Вычисления этих величин по классическим формулам геодезии [5] представляют определённую сложность из-за необходимости выдерживать высокую разрядность.

Поэтому автором данной статьи были получены простые формулы для расчётов  $l_m$  и  $l_p$ , обеспечивающие точность вычислений не хуже 0,1 мм [4]:

$$l_m = K_{11} - K_{22} \cos 2\varphi + K_{33} \cos 4\varphi, \quad l_p = [C_1 - C_2 \cos 2\varphi + C_3 \cos 4\varphi] \cos \varphi. \quad (3)$$

Коэффициенты формул (3) для референц-эллипсоида WGS-84 помещены в табл. 2.

Таблица 2

Коэффициенты для вычисления  $l_m$  и  $l_p$  по формулам (3)

$K_{11}$	$K_{22}$	$K_{33}$	$C_1$	$C_2$	$C_3$
1852,21549	9,33025	0,01936	1858,4416	3,12065	0,00389

Широта  $\varphi$  формул (3) в расчётах СКО obserвованных широт  $\sigma_{\varphi_j}$  и долгот  $\sigma_{\lambda_j}$  принималась равной действительной широте антенны приёмника FSN-70 в месте выполнения экспериментальных наблюдений.

Результаты вычислений средних квадратических отклонений по формулам (2) представлены в виде графиков рис. 3.

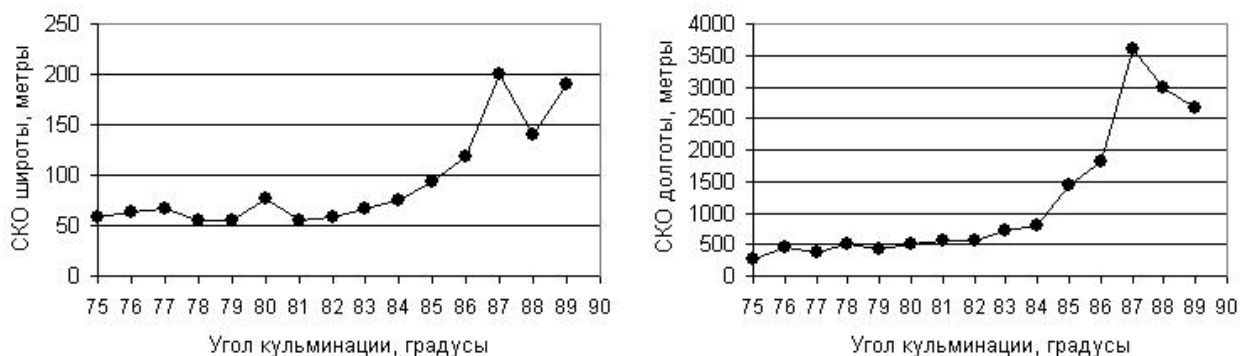


Рис. 3. Случайные погрешности широт (слева) и долгот

Сравнение графиков рис. 3 позволяет сделать вывод об одинаковом характере изменения случайных погрешностей obserвованных широт и долгот в зависимости от угла кульминации спутника. На рис. 3 виден нелинейный рост меры рассеивания координат с увеличением угла кульминации. Если принять неизменность СКО широты и долготы до угла кульминации  $81^\circ$ , то видно, что рассеивание широт в 10 раз меньше рассеивания долгот. При достижении максимальных углов кульминации мера случайных погрешностей становится равной 3,5 км, в то время как у широты она не превышает 200 м. Таким образом, для углов кульминации, близких к  $90^\circ$ , случайная погрешность определения долготы АРБ становится в 17,5 раз больше случайной погрешности широты. Эти факты подтверждают высказанное выше предположение о вытянутости фигуры погрешности ОМБ вдоль параллели.

Чтобы иметь наглядное представление о характере рассеивания obserвованных координат АРБ при больших углах кульминации спутника, рассчитывались отклонения в метрах полученных координат от места установки антенны. Вычисления проводились по всем 957 obserвациям по следующим формулам:

$$x_k = (\lambda_k - \lambda_0) \times l_p, \quad y_k = (\varphi_k - \varphi_0) \times l_m,$$

где  $k = 1, 2, \dots, 957$ ;  $x_k$  – отклонение в метрах по параллели от антенны приёмника FSN-70;  $\lambda_k$  – долгота  $k$ -й obserвации,  $\lambda_0$  – действительная долгота антенны;  $y_k$  – отклонение в метрах



по меридиану от антенны приёмника FSN-70;  $\varphi_k$  – широта  $k$ -й обсервации;  $\varphi_0$  – действительная широта антенны.

О характере отклонения обсерваций от действительного места антенны приёмника FSN-70 можно судить по рис. 4.

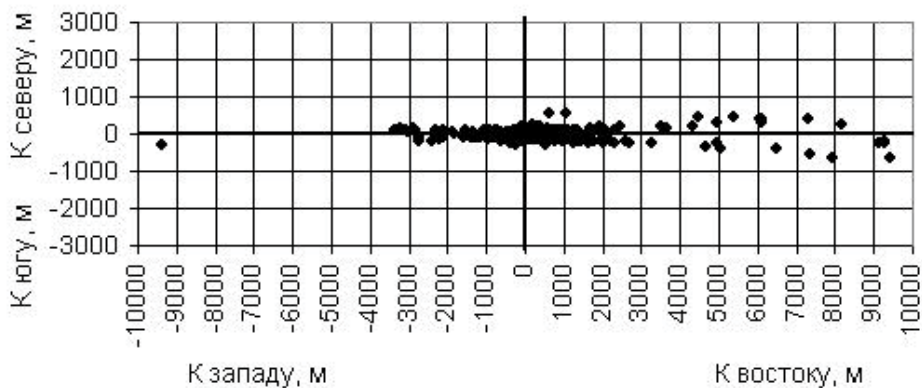


Рис. 4. Распределение координат при больших углах кульминации спутника

Анализируя рис. 4, можно убедиться в отрицательном влиянии больших углов кульминации на точность ОМБ. Когда угол кульминации находится в пределах от  $75^\circ$  до  $89^\circ$ , обсервованная долгота АРБ может находиться в пределах от 10 км к востоку и в 10 км к западу от действительного его места. Значительно ухудшается точность определения широты АРБ по сравнению с ситуациями, когда кульминация спутника происходит при углах, меньших  $75^\circ$ . Как это следует из рис. 4, обсервованная широта АРБ располагается в полосе шириной приблизительно 2 км. Таким образом, если спутник системы КОСПАС-САРСАТ принял сигнал бедствия и определил координаты АРБ, кульминируя относительно его на высотах от  $75^\circ$  до  $89^\circ$ , то поиск потерпевших бедствие следует организовывать на площади не менее  $40 \text{ км}^2$ . Поисковые галсы в таком случае необходимо ориентировать с востока на запад и с запада на восток.

## ЛИТЕРАТУРА

1. 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. Сер. История морской науки, техники и образования. – Владивосток: Мор. гос. ун-т, 2008. – С. 105 – 116.
2. Комаровский, Ю. А. Сезонные изменения точности определения координат доплеровскими спутниковыми навигационными системами / Ю. А. Комаровский // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Вып. № II-1(2). Сер. Науки о природе и технике. – Комсомольск-на-Амуре: ГОУВПО «КнАГТУ», 2010. – С. 51 – 57.
3. Комаровский, Ю. А. Влияние высоты кульминации спутника на продолжительность сеанса связи ПИ FSN-70 / Ю. А. Комаровский // Вестник Морского государственного университета. Вып. 22. Сер. История морской науки, техники и образования. – Владивосток: Мор. гос. ун-т, 2008. – С. 117 – 125.
4. Комаровский, Ю. А. Точные вычисления пройденных расстояний на земных эллипсоидах / Ю. А. Комаровский // Современные проблемы развития и методики преподавания естественных и точных наук: материалы Всероссийской науч.-практ. конф. 16-18 декабря 2009 г. – Уссурийск: Изд-во УГПИ, 2009. – С. 154 – 161.
5. Department of Defense World Geodetic System 1984. DMA Technical Report TR 8350.2. U.S. Geological Survey, October, 1993. – 152 p.