ВЕСТНИК
ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА
МОРСКОГО И РЕЧНОГО ФЛОТА ИМЕНИ АДМИРАЛА С. О. МАКАРОВА

УДК 621.396.933:527.8

А. Н. Маринич,
канд. техн. наук, доцент,
ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова;

А. В. Припотнюк,
ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова;

Ю. М. Устинов,
д-р техн. наук, профессор,
ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова

ТРИ МЕТОДА ОПРЕДЕЛЕНИЯ КООРДИНАТ ПРИ МОНИТОРИНГЕ СУДОВ

THREE METHODS OF DETERMINATION OF COORDINATES WHEN MONITORING VESSELS

Рассмотрены особенности применения трех методов определения координат при мониторинге судов.
Features of application of three methods of determination of coordinates are considered when monitoring vessels.

Ключевые слова: мониторинг, определение места, допплеровский метод, точность, приемник ГНСС.
Key words: monitoring, observation*, Doppler method, accuracy, GNSS receiver.*

В ЗАВИСИМОСТИ от аппаратуры, установленной на судах, для решения задач мониторинга могут использоваться три различных метода (рис. 1).

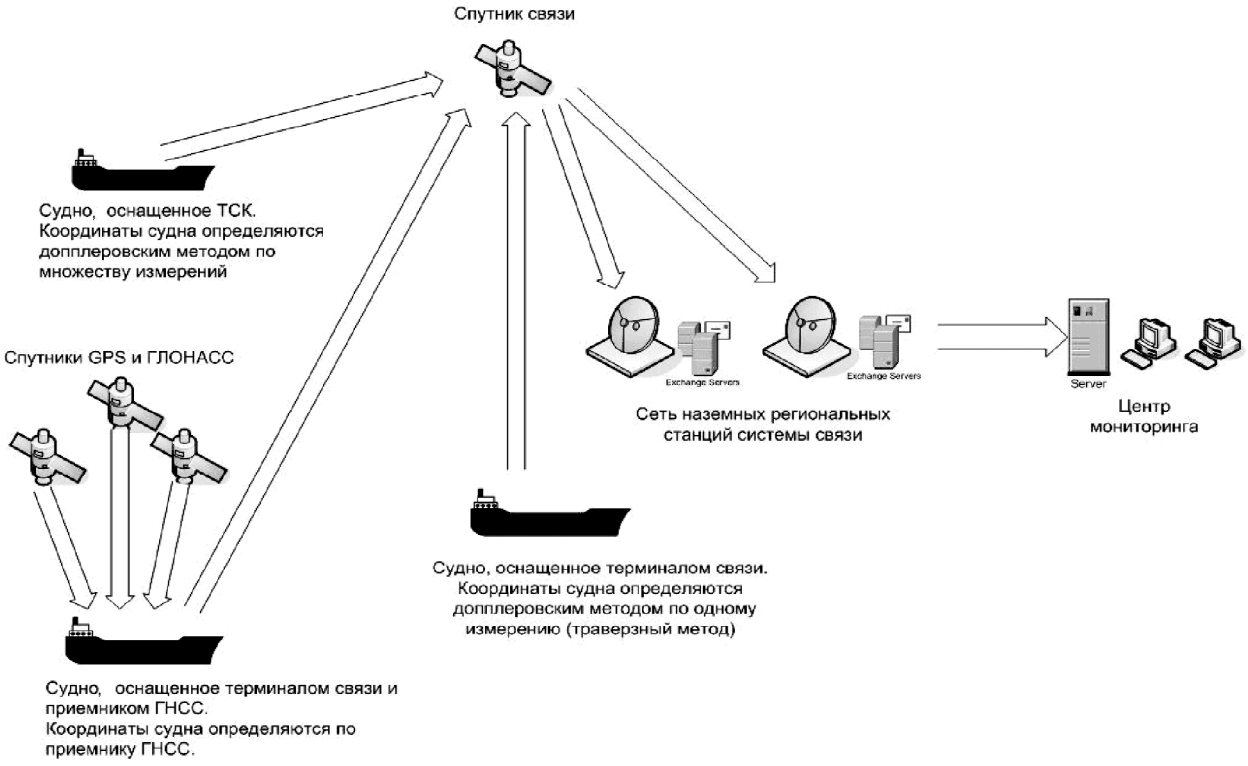

Рис. 1

При первом методе определение координат места судов производится с помощью приемника ГНСС.

При втором методе определение координат производится траверзным методом по одному измерению допплеровской частоты.

При третьем методе также используется допплеровский метод определения координат, но по множеству измерений.

Первый метод является самым распространенным. В настоящее время согласно международным требованиям на всех судах установлены приемники ГНСС (ГЛОНАСС + GPS). В дальнейшем в состав ГНСС войдет и система ГАЛИЛЕО. Определение координат места судна по сигналам ГНСС обеспечивает высокую надежность и точность. Современные приемники ГНСС работают по всем видимым спутникам (метод определения координат "All in View") и используют автономный алгоритм RAIM отбраковки спутников, не соответствующих требованиям по точности.

На основе широко используемой в судовой аппаратуре интеграции в состав многих терминалов связи входят приемники ГНСС, поэтому не требуется устанавливать специальные устройства для мониторинга. Среднеквадратическая погрешность определения координат судна по приемникам ГНСС не превосходит 20 м.

При втором, траверзном методе определение координат судна производится на спутнике связи путем измерения допплеровской частоты в момент $t = t_o$, когда судно находится на траверзе относительно спутника.

Этот метод применяется для спутников, расположенных на полярных орбитах. Для таких орбит ось x совпадает с линией меридиана, а ось y — с линией широты. В момент времени $t = t_o$ значение допплеровской частоты $\Delta f_д = 0$ и допплеровская частота меняет знак (рис. 2, *а*).

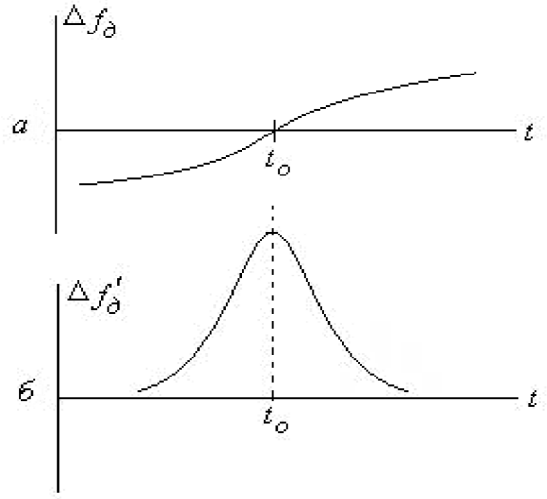

Рис. 2

В этот момент времени широта местонахождения судна равна широте спутника. Таким образом, для определения широты местонахождения судна необходимо определить время, соответствующее минимальному значению допплеровской частоты, измеряемой на спутнике. Так как эфемериды спутника известны, то широта судна легко определяется.

Для определения долготы местонахождения судна необходимо замерить на спутнике скорость изменения допплеровской частоты в момент времени $t = t_o$. На рис. 2, *б* приведен график величины $\Delta f'_д$ в зависимости от времени. Численное значение скорости изменения допплеровской частоты $\Delta f'_д$ в момент времени t_o определяется выражением [1]

$$\Delta f'_д = \frac{\upsilon^2}{\lambda\sqrt{(y_{сп} - y_с)^2 + (z_{сп} - z_с)^2}},$$

где υ — линейная скорость спутника;

λ — длина волны;

$y_{сп}$, $z_{сп}$ — прямоугольные координаты спутника;

$y_с$, $z_с$ — прямоугольные координаты судна, где $z_с$ известно.

В последнем уравнении $(z_{сп} - z_с)$ — разность по высоте положений спутника и судна, $(y_{сп} - y_с)$ — разность по долготе положений спутника и судна. По данным эфемерид спутника, координаты $y_{сп}$, $z_{сп}$ известны. Долгота судна $y_с$ определяется путем решения приведенного выше уравнения.

За 10 с низкоорбитальный спутник перемещается по координате x на расстояние около 80 км. Если априорные координаты судна известны с погрешностью до 80 км, то по данным альманаха спутника можно примерно рассчитать время нахождения спутника на траверзе судна. Для определения координат судна траверзным методом длительность синусоидальной посылки, излучаемой терминалом пользователя, может не превышать 10 с. СКП определения координат судна траверзным методом составляет 1,5–2 км.

При третьем методе определения координат судна необходимо набрать несколько измерений допплеровской частоты за время пролета спутника над судном. На судне устанавливается специальная аппаратура — технические средства контроля (ТСК). ТСК представляет собой передатчик синусоидальных посылок длительностью около 1 с, которые следуют друг за другом с интервалом ~ 1 мин. На спутнике замеряются значения допплеровских частот для каждой принятой посылки за время радиоконтакта спутника с ТСК.

Определим максимальное время видимости спутника над судном. Для расчета максимального времени видимости спутника необходимо определить диаметр подспутниковой зоны видимости спутника и скорость движения спутника по круговой орбите.

Период обращения спутника по круговой орбите вокруг Земли [2]:

$$T = \sqrt{\frac{4\pi^2 r^3}{GM}},$$

где r — радиус орбиты спутника; $G = 6{,}672 \cdot 10^{-11}$ м^3/кг·с^2 — гравитационная постоянная Земли; $M = 5{,}976 \cdot 10^{24}$ кг — масса Земли.

С учетом этих постоянных получим

$$T = 3{,}14 \cdot 10^{-7} r \sqrt{r}.$$

Так как вместо радиуса r принято указывать высоту орбиты спутника h над поверхностью Земли, то $r = h + a$, где $a = 6378 \cdot 10^3$ — радиус Земли.

С учетом этого

$$T = 3{,}14 \cdot 10^{-7} (h + a)\sqrt{h + a}.$$

Линейная скорость спутника:

$$\upsilon = \frac{2\pi \cdot r}{T}.$$

Для определения диаметра подспутниковой зоны видимости под углом места спутника β воспользуемся рис. 3.

Расстояние d до спутника (рис. 3) под углом места спутника β определится из выражения

$$d = \sqrt{(a + h) + a^2 \sin^2 \beta - a^2} - a \sin \beta.$$

Величина Θ, соответствующая краю подспутниковой зоны видимости спутника (рис. 3), на которой спутник виден под углом места β, имеет вид

$$\Theta = \arccos\left[\frac{a^2 + (a + h)^2 - d^2}{2a(a + h)}\right].$$

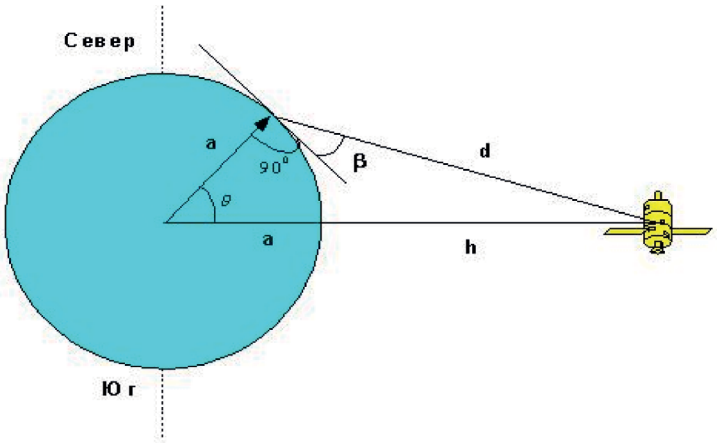

Рис. 3

Диаметр подспутниковой зоны видимости спутника на поверхности Земли:

$$D = a \cdot 2\Theta,$$

где Θ (рад).

Если диаметр подспутниковой зоны видимости D, скорость движения спутника υ, то максимальное время видимости спутника:

$$T_{\text{вид}} = \frac{D}{\upsilon}.$$

С помощью приведенных выражений можно рассчитать максимальное время для сбора данных на спутнике для решения задачи мониторинга допплеровским методом по нескольким измерениям.

Так, если h = 1100 км, D = 6223 км, то $T_{\text{вид}}$ = 16 мин, а число измерений ~ 16.

При уменьшении высоты h максимальное время видимости спутника становится меньше, так как уменьшается диаметр D, а скорость движения спутника возрастает. Напротив, при увеличении h максимальное время видимости спутника больше 16 мин.

Максимальное время видимости спутника $T_{\text{вид}}$ соответствует случаю, когда судно находится в центре подспутниковой зоны, при этом максимальная величина β = 90°. Подспутниковая зона — это круг, центр которого совпадает со следом траектории спутника на поверхности Земли. Если максимальная величина β < 90° во время движения спутника, то судно не находится в центральной точке подспутниковой зоны. В этом случае время видимости спутника будет меньше и определяется величиной:

$$T'_{\text{вид}} = T_{\text{вид}} \sin\beta.$$

При рассматриваемом третьем методе определения координат судна допплеровским методом по одному спутнику для уменьшения погрешности координат целесообразно, чтобы результаты измерения допплеровской частоты как можно больше были разнесены во времени. С увеличением разноса во времени возрастает пройденное спутником расстояние и, следовательно, база системы. Из теории навигации известно, что погрешности координат уменьшаются при увеличении базовых расстояний.

Для определения координат судна x_c, y_c допплеровским методом при известной координате z_c достаточно измерить три значения допплеровской частоты; в начале, когда спутник становится видимым в подспутниковой зоне, в середине и в конце, когда спутник выходит из подспутниковой зоны.

В результате трех измерений получаем три уравнения:

$$\begin{cases} \dfrac{(x_{сп1}-x_c)\dot{x}_{сп1}+(y_{сп1}-y_c)\dot{y}_{сп1}+(z_{сп1}-z_c)\dot{z}_{сп1}}{\sqrt{(x_{сп1}-x_c)^2+(y_{сп1}-y_c)^2+(z_{сп1}-z_c)^2}}=\lambda(\Delta f_{кд1}+\Delta f_{рас}); \\ \dfrac{(x_{сп2}-x_c)\dot{x}_{сп2}+(y_{сп2}-y_c)\dot{y}_{сп2}+(z_{сп2}-z_c)\dot{z}_{сп2}}{\sqrt{(x_{сп2}-x_c)^2+(y_{сп2}-y_c)^2+(z_{сп2}-z_c)^2}}=\lambda(\Delta f_{кд2}+\Delta f_{рас}); \\ \dfrac{(x_{сп3}-x_c)\dot{x}_{сп3}+(y_{сп3}-y_c)\dot{y}_{сп3}+(z_{сп3}-z_c)\dot{z}_{сп3}}{\sqrt{(x_{сп3}-x_c)^2+(y_{сп3}-y_c)^2+(z_{сп3}-z_c)^2}}=\lambda(\Delta f_{кд3}+\Delta f_{рас}), \end{cases}$$

где $x_{сп1}, y_{сп1}, z_{сп1}$; $x_{сп2}, y_{сп2}, z_{сп2}$; $x_{сп3}, y_{сп3}, z_{сп3}$ — прямоугольные координаты спутника в моменты первого, второго и третьего измерений; x_c, y_c, z_c — прямоугольные координаты судна, не имеющего хода (z_c известна); $\Delta f_{кд1}$, $\Delta f_{кд2}$, $\Delta f_{кд3}$ — результаты измерений допплеровской частоты в моменты первого, второго и третьего измерений; $\Delta f_{рас}$ — величина расстройки номиналов частоты генератора ТСК и генератора на спутнике. По результатам решения трех уравнений определяются x_c, y_c, $\Delta f_{рас}$.

Если за время пролета спутника над судном производится много измерений допплеровской частоты, то в результате сглаживания погрешности определения координат судна уменьшаются.

СКП определения координат судна допплеровским методом по множеству измерений допплеровской частоты лежит в пределах от 250 до 1500 м.

В результате сравнения трех методов определения координат судна при мониторинге первый метод определения координат с помощью приемников ГНСС является наиболее перспективным. Этот метод имеет наилучшую точность. При этом методе измеренные координаты становятся известными как на судне, так и в центре мониторинга.

Учитывая, что терминалы связи являются интегрированными (в состав терминалов входят приемники ГНСС), этот метод не требует дополнительного оборудования как на судне, так и на спутнике.

Второй и третий методы обеспечивают определение координат судна только в центре мониторинга. Чтобы получить координаты собственного судна, необходим запрос в центр мониторинга.

Заканчивая сравнение, отметим, что при первом методе возможно передавать в центр мониторинга фальсифицированные координаты судна. При допплеровском методе это невозможно. Поэтому независимые методы определения координат одновременно первым и третьим методами широко используются в центрах мониторинга рыбопромысловых судов, так как позволяют выявлять суда-браконьеры.

Заключение.

Независимые методы определения координат с помощью приемников ГНСС и по результатам допплеровских измерений позволяют исключить грубые промахи при решении задач мониторинга.

Список литературы

1. *Никитенко Ю. И.* Судовые радионавигационные системы: учебник для вузов / Ю. И. Никитенко, В. И. Быков, Ю. М. Устинов. — М.: Транспорт, 1992. — 336 с.

2. Цифровые терминалы спутниковых систем связи: справ. изд. / А. А. Ильин [и др.]; под общ. ред. Ю. М. Устинова. — СПб.: Деан, 2005. — 192 с.: с ил.