

УДК 651.61.052.1 : 520

К вопросу о применении современных информационных технологий при астронавигационном определении места судна

Б.А. Вульфович, В.А. Фогилев

Судоводительский факультет МА МГТУ, кафедра судовождения

Аннотация. В статье рассматривается вопрос об отказе от использования графического метода линий положения при астронавигационных способах определения координат судна и переходе на основе современных информационных технологий к автоматизированной обработке информации при проведении астрономических наблюдений. Автором предлагаются перспективные направления исследований в этой области.

Abstract. The problem of using special software products and computer systems during celestial fixes has been considered in the paper. The attention has been paid to the simplicity and accuracy of estimation of the ship's fix in comparison with the graphical "line of position" (LOP) method. The author has proposed perspective ways in the research of the celestial fixes.

1. Введение

В настоящее время использование ЭВМ и элементов цифровой техники приобретает особое значение в системах комплексной судовой автоматизации, в том числе и в системе автоматизации процессов судовождения. В обозримом будущем предусмотрено широкое внедрение автоматизации в производственный процесс, а это должно привести к внедрению новой технологии. Под технологией производственных процессов в судовождении понимаются новые методы получения необходимых сведений (информации) для осуществления систематического контроля за движением судна и управления этим движением. Проблема автоматизации судовождения включает в себя три основных направления: получение навигационной информации, обработку навигационной информации, управление судном как объектом автоматического регулирования. Каждое из этих направлений содержит множество различных проблем, некоторые из которых решены, многие решаются, другие ждут своего решения. В вопросе обработки навигационной информации можно отметить, что создание единой методологии расчета линий положения и расчета координат судна значительно упростит обработку азимутальных, скоростно-высотных и скоростно-азимутальных способов определения места судна.

Несмотря на развитие спутниковых систем навигации, астрономические способы определений места не утратили своего значения для обеспечения навигационной безопасности плавания (*Международная...*, 1993). Даже при дальнейшем развитии глобальных навигационных систем автономные астрономические способы определений места надолго останутся как резервные, благодаря надежности секстана и хронометра, а для определения поправки компаса в открытом море пока не существует иных способов.

Красавцев Б.И. (1966) справедливо отмечает, что дифференциальные методы открывают возможность определения места по краткосрочным наблюдениям одного светила, осуществляемым в течение 5-10 минут. При достаточной точности инструментально-измерительных средств (порядка 3') они способны обеспечить среднеквадратическую ошибку положения ± 500 м. Подобная сравнительно высокая точность вместе с отмеченным преимуществом дифференциальных методов не может не привлечь внимания к различным аспектам вопроса, например, общей методологии определения положения, принципам ее инструментально-технического осуществления, обоснованию рациональных инженерно-конструкторских решений.

В течение длительного времени мореходная астрономия развивалась без принципиальных изменений, путем совершенствования применяемых инструментов, пособий и методов, если не считать создания радиосекстанов, которые из-за их сложности и дороговизны пока не применяются на транспортных и рыболовных судах. Наиболее существенные перемены связаны с использованием вычислительной техники. В развитии мореходной астрономии проявляются следующие тенденции: разработка алгоритмов для ЭВМ и способов ускоренной обработки наблюдений; исследование и уменьшение влияния систематических и грубых погрешностей измерений; отказ от неэффективных частных способов, например, с близмеридиональными высотами. Увеличивающиеся скорости судов и

плотность судоходных потоков обостряют дефицит времени на мостике. Этим обусловлен возрастающий интерес не только к автоматизации, но и к способам ускоренной обработки астрономических наблюдений.

2. Математические основы автоматизированных аналитических методов обработки астрономических обсерваций

Как показывает практика, значительная часть функциональной деятельности судоводителя связана с выполнением различных, в том числе весьма сложных, вычислений. Вследствие этого капитан и штурман в своей практике широко пользуются специальными таблицами, номограммами, графиками и другими пособиями, которые несколько облегчают и упрощают их труд. Далеко не всегда перечисленные пособия позволяют решать задачи быстро и безошибочно. По исследованию *М.И. Гаврюка* (1980), из 405 задач по астрономии, выполненных судоводителями средней квалификации, ошибки были допущены в 184 случаях. Таким образом, вероятность промаха при решении достигает 0,45. Очевидно, что на помощь судоводителю должны прийти простые и удобные в использовании вычислительные системы, специально разработанные или приспособленные для решения навигационных задач. На ряде судов уже сейчас внедрены автоматизированные навигационные комплексы, которые освобождают судоводителя от многих вычислительных работ. Внедрение на судах морского и рыбопромыслового флотов ЭВМ, включенных в навигационные комплексы, будет представлять значительный скачок в области судовождения. Все ЭВМ, применяемые на судах, разделяются на две группы: специализированные, которые решают ограниченный круг задач по заранее введенным и жестко "защитым" программам, и универсальные, допускающие решение разных задач, в том числе по изменяемым или вновь составленным программам. Первая группа вычислительной техники характерна тем, что при работе с ней, кроме ясного понимания задач, от судоводителя требуется только умение вводить исходные данные (эта процедура все чаще автоматизируется) и использовать полученные результаты. К этой группе относятся ЭВМ навигационных автоматизированных комплексов (НАК). Программное обеспечение ЭВМ НАК охватывает широкий круг навигационных и эксплуатационных задач, по многим из которых ввод исходных данных частично или полностью автоматизирован. Составление новых программ или их изменение силами судоводителя не предусматривается. Вторая группа вычислительной техники характерна необходимостью выбрать методы решения задач и вычислений, приводить формулы к рабочему виду и составлять программы с учетом возможностей применяемой вычислительной техники.

Выбор метода зависит, конечно, от решаемой задачи и требуемого уровня точности. Разовые и редко встречающиеся задачи нецелесообразно программировать. Надежнее и с меньшей затратой времени такие задачи решать пошаговым счетом так, как это делал бы судоводитель вручную, возможно, с частичным использованием таблиц и диаграмм. Эта рекомендация не относится к аварийным задачам. Такие задачи решать приходится не часто, но когда такая необходимость, к сожалению, возникает, то дорога каждая секунда. Для аварийных задач любая возможная заблаговременная подготовка всегда оправдана. Но если применяемая ЭВМ не имеет носителя информации с заранее заготовленными программами, то решение на ней задач в аварийной ситуации может оказаться неверным или запоздалым. Лучше, видимо, заранее просчитать несколько вариантов, охватывающих весь диапазон возможных условий. Для часто решаемых типичных судовых задач их тщательная подготовка к вычислениям на ЭВМ позволяет намного повысить надежность решения за счет уменьшения вероятности неверных действий, а также ускорить получение ответа (*Кондрашихин*, 1989).

При выборе метода и расчетных алгоритмов стремятся, во-первых, максимально упростить ввод исходных данных, повысить наглядность и информативность получаемых результатов. Во-вторых, стараются избежать вставок в программу и ее дополнений с пошаговым счетом, а также необходимости записи промежуточных результатов с последующим их вводом. Наконец, в-третьих, желательно избежать необходимости анализа знаков в процессе счета, использования различных правил, таблиц и диаграмм. Приведем конкретные примеры использования этих рекомендаций при оптимизации решений задач мореходной астрономии (*Рыбалтовский*, 1964).

В основе лежит идея отказа от общепринятого метода линий положения и связанной с ним графической прокладки этих линий на бумаге. Вместо линий положения (касательных) непосредственно рассматриваются исходные изолинии-изостадии – малые круги на небесной сфере с радиусами, равными измеренным навигационным параметрам – высотам светил h_{o1} и h_{o2} (*Вульфович*, 1989; 1994; 2008).

Во-первых, отпадает необходимость в достаточно сложном расчёте счислимых значений высот h_{c1} и h_{c2} . Во-вторых, устраняется принципиальная погрешность от замены изолиний (дуг кривых) их линиями положения (касательными к этим дугам). На эту принципиальную погрешность накладывается и погрешность самого графического построения. В результате обсервованное место судна M_o , как точка

пересечения изолиний, будет гораздо ближе к истинному месту, чем точка пересечения касательных к изолиниям (линий положения). Суммарная погрешность при этом может достигнуть нескольких миль.

При создании программного обеспечения, о котором говорилось выше, метод итераций удобно использовать при определении места судна по высотам двух звёзд (или звезды и планеты). Для этого в уравнения изолиний-изостадий (кругов равных высот) $z_1 = (90^\circ - h_1) = \text{const}$ и $z_2 = (90^\circ - h_2) = \text{const}$ подставляются координаты $(\delta_{1,2}; t_{1,2})$ и обсервованные высоты $h_{1,2}$ обеих звезд. Тогда имеет место система двух уравнений относительно искомым обсервованных координат φ_0 и λ_0 :

$$\begin{cases} \sin h_{o1} = \sin \varphi_0 \sin \delta_1 + \cos \varphi_0 \cos \delta_1 \cos(t_{ep1}^* \pm \lambda_{w0}^E); \\ \sin h_{o2} = \sin \varphi_0 \sin \delta_2 + \cos \varphi_0 \cos \delta_2 \cos(t_{ep2}^* \pm \lambda_{w0}^E). \end{cases} \quad (1)$$

На первый взгляд система кажется простой: есть два уравнения и лишь два неизвестных – φ_0 и λ_0 , да и геометрический смысл прост, искомые координаты $(\varphi_0; \lambda_0)$ определяются точкой пересечения изостадий в окрестности счислимой точки $M_0(\varphi_0; \lambda_0)$.

В конечном виде система уравнений легко не решается, ибо искомые $(\varphi_0; \lambda_0)$ являются аргументами разных тригонометрических функций. В этих условиях оказывается удобным метод итераций, или последовательных приближений.

Геометрически итерационный процесс выглядит следующим образом. У каждой последующей точки уточняется одна из координат, например, сначала широта φ , а потом долгота λ . Покажем, как разворачивается этот процесс, начиная с исходных координат счислимой точки $M_c(\varphi_c; \lambda_c)$.

Перепишем систему без индексов координат судна $(\varphi; \lambda)$:

$$\begin{cases} \sin h_{o1} = \sin \varphi \sin \delta_1 + \cos \varphi \cos \delta_1 \cos(t_{ep1}^* \pm \lambda_{w0}^E); \\ \sin h_{o2} = \sin \varphi \sin \delta_2 + \cos \varphi \cos \delta_2 \cos(t_{ep2}^* \pm \lambda_{w0}^E). \end{cases} \quad (2)$$

Подставим в систему счислимую широту $\varphi = \varphi_c$ и, тем самым, найдем первое приближение долготы $\lambda = \lambda_1$:

$$\cos(t_{ep1}^* \pm \lambda_{w1}^E) = (\sin h_{o1} - \sin \varphi_c \sin \delta_1) / (\cos \varphi_c \cos \delta_1). \quad (3)$$

Откуда

$$\lambda_1 = (t_{ep1}^* \pm \lambda_{w1}^E) - t_{ep1}^*. \quad (4)$$

Таким образом, найдена первая итеративная точка $M_1(\varphi_c; \lambda_1)$.

Подставим найденную долготу $\lambda = \lambda_1$ во второе уравнение и будем искать первое приближение широты $\varphi = \varphi_1$:

$$\sin h_{o2} = \sin \varphi_1 \sin \delta_2 + \cos \varphi_1 \cos \delta_2 \cos(t_{ep2}^* \pm \lambda_{w1}^E). \quad (5)$$

Уравнение содержит искомую широту φ_1 под знаками \sin и \cos , поэтому его удобно переписать в виде:

$$A \sin \varphi_1 + B_1 \cos \varphi_1 = N, \quad (6)$$

где $A = \sin \delta_2 = \text{const}$; $B_1 = \cos \delta_2 \cos(t_{ep2}^* \pm \lambda_{w1}^E)$; $N = \sin h_{o2} = \text{const}$.

Для решения данного уравнения возможно использовать различные способы; наиболее удобен – тригонометрический, в итоге найдем приближение широты φ_1 :

$$\text{tg} \theta_1 = B_1 / A, \quad (7)$$

$$\sin(\varphi_1 + \theta_1) = N / (A^2 + B_1^2)^{0.5}, \quad (8)$$

$$\varphi_1 = (\varphi_1 + \theta_1) - \theta_1. \quad (9)$$

Таким образом, найдена вторая итерационная точка: $M_2(\varphi_1; \lambda_1)$.

Второе приближение долготы $\lambda = \lambda_2$ найдем по аналогичным формулам, где вместо φ_c стоит итерация широты $\varphi = \varphi_1$:

$$\cos(t_{ep1}^* \pm \lambda_{w2}^E) = (\sin h_{o1} - \sin \varphi_1 \sin \delta_1) / (\cos \varphi_1 \cos \delta_1). \quad (10)$$

Откуда

$$\lambda_2 = (t_{ep1}^* \pm \lambda_{w2}^E) - t_{ep1}^*. \quad (11)$$

Таким образом, найдена третья итерационная точка: $M_3(\varphi_1; \lambda_2)$.

Второе приближение широты $\varphi = \varphi_2$ находим по аналогичным формулам. Вместо широты φ_1 подставлена искомая широта φ_2 , а вместо λ_1 – найденная долгота λ_2 :

$$A \sin \varphi_1 + B_2 \cos \varphi_1 = N, \quad (12)$$

где $B_2 = \cos \delta_2 \cos(t_{ep2}^* \pm \lambda_{w2}^E)$.

$$\text{tg} \theta_2 = B_2 / A, \quad (13)$$

$$\sin(\varphi_2 + \theta_2) = N/(A^2 + B_2^2)^{0.5}, \quad (14)$$

$$\varphi_2 = (\varphi_2 + \theta_2) - \theta_2. \quad (15)$$

Таким образом найдена четвертая итерационная точка $M_4(\varphi_2; \lambda_2)$.

По изложенной методике весь итерационный вычислительный цикл продолжается, например, до тех пор, пока одновременно не выполнится:

$$|\varphi_{i+1} - \varphi_i| \leq \varepsilon; |\lambda_{i+1} - \lambda_i| \leq \varepsilon,$$

где критерий $\varepsilon = 0.2'$.

Есть все основания утверждать, что сходимость процесса обеспечена, в частности, его необходимым условием является то, что исходной служит счислимая точка, близкая к искомой.

Наконец, о практическом применении метода. Несмотря на сравнительную простоту формул цикла алгоритма, "ручные" калькуляторные вычисления по ним весьма утомительны, особенно если количество циклов может оказаться больше двух-трех. Наиболее целесообразно составить по этим формулам программу и автоматизировать вычисления, тогда итеративный метод следует признать простым и удобным.

К примеру, для счислимого места судна $M_c(\varphi_c = 48^\circ 47.0' N; \lambda_c = 46^\circ 46.0' W)$ при измеренных высотах звезд $h_{o1} = 49^\circ 17.8'; h_{o2} = 42^\circ 15.2'$ (остальные данные опущены) обсервованные координаты оказались равными: $M_o(\varphi_o = 48^\circ 54.4' N; \lambda_o = 46^\circ 53.7' W)$. Для получения этого результата понадобилось 13 итераций (Рыбалтовский, 1964). Обработка же на ручном программируемом калькуляторе по нашему алгоритму заняла 4-5 сек. (с тем же результатом).

Этот же пример был обработан с помощью пакета прикладных математических программ *Mathematica*® (Version Number: 5.0.0.0; Platform: Windows). В результате решения данной системы уравнений было получено 4 пары корней $M_o(\{\varphi_o = 169^\circ 42.43' N; \lambda_o = 56^\circ 46.47' W\}; \{\varphi_o = 48^\circ 54.41' N; \lambda_o = 46^\circ 54.00' W\}; \{\varphi_o = 10^\circ 17.57' N; \lambda_o = 123^\circ 13.32' W\}; \{\varphi_o = 131^\circ 05.60' N; \lambda_o = 133^\circ 05.99' W\})$. Выявить 3 пары посторонних корней достаточно просто, так как известны координаты счислимой точки. В итоге, координаты обсервованной точки имели следующие значения $M_o(\varphi_o = 48^\circ 54.41' N; \lambda_o = 46^\circ 54.00' W)$.

3. Заключение

Теория и практика определений места судна непрерывно развиваются совместными усилиями моряков и ученых, что необходимо для обеспечения безопасности мореплавания. Статистические исследования навигационной информации будут продолжаться с целью уточнения оценок погрешностей и корреляций, принимаемых в качестве априорных, а также для выявления зависимости таких оценок от условий измерений. При этом особо важным становится изучение распределений больших погрешностей, которые в конкретных условиях проявляются систематически, и грубых погрешностей (промахов и выбросов). Конечно, такие исследования должны распространяться и на новые технические средства судовождения (Дьяконов и др., 1970).

Результаты названных исследований позволят более объективно оценивать точность определений места, а также послужат для повышения этой точности посредством оптимизации обработки навигационной информации с учетом ее статистических характеристик.

Такая оптимизация полностью достижима только при использовании навигационных автоматизированных комплексов, включающих ЭВМ. Близкие к оптимальным решения могут быть получены применением упрощенных методов и рекомендаций, ориентированных на обработку измерений с помощью микрокалькуляторов или портативных персональных компьютеров (ПК), которые все шире применяются на судах. Наиболее эффективны портативные ПК с программными продуктами, хранящимися одновременно на внутренних и, в качестве резервных копий, внешних носителях информации. Такие портативные ПК могут быть специализированы набором программ применительно к данному судну и условиям его работы.

Разработка международных требований к точности судовождения и принятая регламентация таких требований порождают вопрос о том, какие типы судов (их навигационное оборудование) и в каких условиях плавания удовлетворяют названным требованиям, или что надо сделать для их удовлетворения. Вопрос этот кажется весьма сложным. В расширенной постановке он связан с исследованиями влияния человеческого фактора, динамики и траекторных характеристик судов и надежности функционирования полиэргатической (включающей коллектив людей) системы судовождения в целом.

Продолжающееся быстрое усложнение условий судовождения, особенно в районах интенсивного судоходства, стимулирует развитие автоматизированных комплексов. По той же причине все большая часть работ по навигационному обеспечению плавания должна переноситься на период

подготовки к плаванию или переходу, для чего требуются методические разработки и активное участие судоводителей-практиков.

Перечисленные задачи и направления исследований тесно взаимосвязаны, и ими, конечно, далеко не исчерпывается проблематика многогранной, быстро развивающейся науки судовождения.

Литература

Вульфович Б.А. Основы судовождения. *Мурманск, МГТУ*, 150 с., 2008.

Вульфович Б.А. Оценка параметров малых рядов наблюдений. *Записки по гидрографии*, № 230, с.20-24, 1994.

Вульфович Б.А. Реальная оценка точности места судна, определенного астрономическими методами. *Записки по гидрографии*, № 223, с.25-31, 1989.

Гаврюк М.И. Использование малых вычислительных машин при решении задач судовождения. *М., Транспорт*, 237 с., 1980.

Дьяконов Ю.М., Филиппов Ю.М., Сазонов А.Е. Теоретические основы судовождения. *Л., Судостроение*, 312 с., 1970.

Кондрашихин В.Т. Определение места судна. *М., Транспорт*, 232 с., 1989.

Красавцев Б.И. Инструменты и методы мореходной астрономии. *М., Транспорт*, 86 с., 1966.

Международная Конвенция о подготовке и дипломировании моряков и несении вахты 1978 года (ПДМНВ-78). Резолюция ИМО 2750 С (XXV). *СПб., ЦНИИМФ*, 9 с., 1993.

Рыбалтовский Н.Ю. Практическая мореходная астрономия. *М., Транспорт*, 126 с., 1964.