

G
A-53

МИНИСТЕРСТВО МОРСКОГО ФЛОТА СССР

**Ленинградское высшее инженерное морское училище
имени адмирала С. О. МАКАРОВА**

На правах рукописи

**МАКАРОВ
Геннадий Васильевич**

**Оценка места по зависимым
навигационным параметрам**

(Специальность 05.22.17. Водные пути сообщения и
гидрография)

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

**ЛЕНИНГРАД
1973**

МИНИСТЕРСТВО МОРСКОГО ФЛОТА СССР

Ленинградское высшее инженерное морское училище
имени адмирала С. О. МАКАРОВА

На правах рукописи

МАКАРОВ
Геннадий Васильевич

Оценка места по зависимым
навигационным параметрам

(Специальность 05.22.17. Водные пути сообщения и
гидрография)

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

ЛЕНИНГРАД
1973

Диссертация выполнена в Ленинградском высшем инженерном морском училище им. адм. С. О. Макарова.

Научный руководитель — лауреат Государственной премии СССР, доктор технических наук, профессор Б. И. НИКИФОРОВ.

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор В. А. КОУГИЯ

доктор технических наук, профессор Ю. М. ФИЛИППОВ

Ведущая организация — Гидрографическое Предприятие Министерства морского флота.

Автореферат разослан «17» *сентября* 1973 г.

Защита диссертации состоится «18» *октября* 1973 г. на заседании Совета Судоводительского и Арктического факультетов Ленинградского высшего инженерного морского училища им. адм. С. О. Макарова по адресу: Ленинград, Заневский пр. 5.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке училища.

Отзывы просим направлять в 2 экземплярах по адресу:

Ленинград, 199111, Косая линия, д. 15-а, ЛВИМУ им. адм. С. О. Макарова.

Ученый секретарь

Совета СВФ и АФ ЛВИМУ им. адм. С. О. Макарова

доктор технических наук, профессор И. А. БЛИНОВ

Быстрый рост интенсивности судоходства вместе с увеличением грузоподъемности судов, их осадок, скоростей и т. д. усложняет практику судовождения и предъявляет повышенные требования к точности и надежности решения основной задачи судовождения — задачи точной и безопасной проводки судов в установленные сроки и по заранее выбранному пути.

Успешное решение этой задачи во многом определяется полнотой и качеством гидрографического обеспечения, в частности, качеством картографических материалов и точностью положения опорных пунктов (станций радионавигационных систем, маяков, буев, вех и пр.), регламентирующих движение морского транспорта, а также эффективностью контроля за перемещением судна.

Важнейшей составной частью работ по гидрографическому обеспечению и контролю движению судна является определение координат места (координат опорных пунктов, координат неподвижного или движущегося судна и др.) и точностных характеристик его положения.

Оценка места — определение координат места и характеристик точности его положения — основывается на использовании результатов инструментальных измерений различных физических величин — пеленгов, расстояний, разностей расстояний, высот светил и пр. Измеряемые для определения места физические величины принято называть навигационными параметрами.

Навигационные параметры, как всякие результаты измерений, могут быть как независимыми, так и зависимыми. В подавляющем большинстве используемые для определения места параметры относятся к взаимозависимым величинам.

Вопросы оценки места по зависимым навигационным параметрам, тесно связанные с недостаточно изученной в настоящее время проблемой учета систематических ошибок результатов измерений, не получили еще четкого и исчерпывающего решения, и служат уже в течение длительного времени предметом дискуссии на страницах научной литературы.

В учебной литературе по навигации, мореходной астрономии, автоматизации судовождения, гидрографии вопросы обработки зависимых параметров освещаются недостаточно полно, а иногда и неверно, что естественно, вносит определенные трудности в преподавание этих дисциплин и снижает уровень подготовки кадров для морского флота.

Развивающийся процесс автоматизации судовождения, широкое внедрение в гидрографическую и судоводительскую практику электронновычислительных устройств предопределяет переход от традиционных графических приближенных способов обработки навигационной информации к аналитическим строгим способам.

Изложенное обосновывает необходимость разработки рациональных методов оценки места по зависимым результатам измерений с учетом их систематических ошибок применительно к задачам гидрографии, навигации, мореходной астрономии с ориентировкой на современные средства обработки информации.

В работе приведены аналитические решения задач по оценке места с использованием современного математического аппарата применительно к запросам гидрографии и судовождения. Проводится сравнение предлагаемых в работе методов решения с существующими, широко применяемыми на практике, с иллюстрацией рекомендуемых методов на конкретных числовых примерах.

Вместе с решением поставленных конкретных вопросов по оценке места в работе затронуты основные положения теории ошибок измерений, касающиеся, главным образом, определения и учета систематических ошибок. При этом получены выводы, отличающиеся от принятых в публикациях последнего времени, и позволившие снять некоторые спорные вопросы в теории математической обработки коррелированных измерений с учетом систематических ошибок.

Диссертация состоит из введения, трех глав и заключения.

В первой главе диссертации изложены теоретические основы обработки навигационных измерений с учетом их систематических ошибок, рассмотрены строгие и приближенные методы оценки места по двум зависимым параметрам, а также вопросы, касающиеся наивыгоднейших условий определения места.

В гидрографической и судоводительской практике для определения места, как правило, используются параметры, представляющие собой функции нескольких непосредственно

измеренных величин. При этом в образовании параметров обычно участвуют одни и те же измеренные величины, в частности поправки, исключаящие из параметров систематические ошибки. Очевидно, такие параметры являются взаимозависимыми величинами. К взаимозависимым параметрам относятся также и параметры, приведенные к одному моменту времени, месту или зениту наблюдателя, вследствие того, что вводимые в разновременные наблюдения поправки являются функциями одних и тех величин, в частности курса (пути) судна и его скорости.

Характеристики связи такого типа параметров (корреляционные моменты, коэффициенты корреляции или корреляционная матрица) могут быть найдены, используя теорему о распространении числовых характеристик функций («правило переноса ошибок» по Д. Худсону *).

$$K = TK_c T^*$$

где K — корреляционная матрица параметров,
 T — матрица преобразования, составленная из частных производных от оцениваемых параметров (функций) по составляющим параметрам (аргументам функций),
 K_c — корреляционная матрица составляющих параметров.

На нескольких примерах в работе показана техника применения правила переноса ошибок к параметрам, представляющим собой угловые и линейные физические величины. Показано, что в отличие от параметров — угловых физических величин характеристики связи параметров — линейных величин зависят не только от ошибок составляющих параметров, но и от величин самих составляющих. В связи с этим отмечена ошибочность встречающихся в литературе предложений использовать при анализе радионавигационных измерений формулы, справедливые лишь для параметров — алгебраических сумм независимых составляющих.

Относительно параметров, содержащих одни и те же измеренные величины, в литературе по гидрографии, навигации, мореходной астрономии принято говорить, что эти параметрыотягощены случайными и так называемыми «повторяющимися» ошибками, при этом подавляющее большинство авторов относят «повторяющиеся» ошибки, т. е. ошибки, общих

* Д. Худсон. Статистика для физиков. М., «Мир», 1970.

для нескольких параметров, измеренных величин к систематическим.

Мнение о «систематичности» повторяющихся ошибок основывается на следующем. Утверждается, что ошибка измеренной величины, участвующей в образовании двух и более параметров, проявляется как систематическая, так как возможные изменения этой ошибки приводят к рассеиванию обсервованных мест, отличному от эллиптического, т. е. к смещению места по какой-либо определенной линии. Например, при определении места по пеленгам двух ориентиров ошибка поправки компаса причисляется к систематическим на том основании, что она вызывает смещение обсервованной точки вдоль дуги окружности, проходящей через эту точку и ориентиры. Действительно, такое смещение имеет место, но при условии неизменности численных значений компасных пеленгов и их «истинных» ошибок. Однако это смещение, как доказывается в работе, никакого отношения к классификации ошибок не имеет.

В самом деле, если принять в той же мере искусственное допущение о неизменности одного из компасных пеленгов, поправки компаса и их ошибок и рассматривая действие совокупности всех возможных значений ошибки второго пеленга, заметим, что обсервованное место смещается также по определенной линии, а именно, по изолинии первого истинного пеленга, т. е., придерживаясь рассматриваемого признака, приходим к ошибочному заключению, что ошибка пеленга является систематической.

Таким образом, широко используемый признак выделения ошибок непосредственно измеренных величин в категорию систематических по характеру их изолированного воздействия на определяемое место базируется на искусственном ограничении условий решаемой задачи, вследствие чего должен быть признан несостоятельным.

Показано, что выводы и предложения, основывающиеся на этом признаке «систематичности» ошибок, оказываются бессодержательными и неверными. Таковы принципы подразделения ошибок на случайные и систематические, опубликованные кандидатом техн. наук В. Т. Кондрашиным в статье «Об основных понятиях теории ошибок» в 12 вып. сб. «Судоходство» за 1972 г.; таково распространенное мнение о несимметричности законов распределения такого рода навигационных параметров; таковы и содержащиеся во многих учебниках, учебных пособиях и руководствах рекомендации по

оценке точности места различного рода фигурами погрешностей, при построении которых используются линии смещения места под влиянием ошибок общего для параметров измерения.

Некоторые авторы относят ошибки определения поправок (ошибки систематических ошибок) к систематическим. Между тем, методы определения поправок или систематических ошибок практически ничем не отличаются от методов производства любых измерений и как установлено практикой и многочисленными исследованиями, проведенными Ю. К. Барановым, В. Ф. Дьяконовым, Ю. Г. Зурабовым, В. Т. Кондрашиным, А. Н. Раховецким, В. П. Топаловым и др. ошибки измеренных поправок или систематических ошибок имеют нормальное или близкие к нормальному законы распределения и обладают всеми свойствами случайных ошибок и, в частности, нулевым математическим ожиданием.

Последнее свойство (равенство математического ожидания нулю), присущее случайным ошибкам, никак не может быть отнесено к систематическим. Напротив, отличие от нуля математического ожидания и является наиболее характерной чертой систематических ошибок (поправок), влияние которых на результат измерения, как известно, носит обязательно закономерный характер. Закономерное изменение результатов измерений под действием систематической ошибки определяется конкретной физической величиной, порождающей эту ошибку. Следовательно, источником систематической ошибки является влияющая физическая величина, т. е. «физическая величина, не являющаяся измеряемой данным средством измерений, но оказывающая влияние на результаты измерений этим средством». (ГОСТ 16263—70, термин 7.14).

Из изложенного следует, что систематическая ошибка может быть определена, как случайная составляющая общей погрешности результата измерения, имеющая своим источником влияющую физическую величину, с математическим ожиданием отличным от нуля и распределением в большинстве случаев близким к нормальному.

Такое представление о систематической ошибке позволяет отказаться от некоторых формальных и спорных положений, существующих в современной литературе по теории ошибок измерений, в частности, тех положений, которые основываются на нулевых математических ожиданиях и случайных, и систематических ошибок.

Так, например, совместное влияние на результаты измерений случайных ошибок и систематической («постоянной», «повторяющейся») ошибки правильнее выразить формулой

$$m_{\text{общ.}} = \sqrt{m^2_{\text{случ.}} + m^2_N}$$

где m_N — средняя квадратическая случайная ошибка определения поправки $-N$, исключаяющей систематическую ошибку N из результатов измерений.

Приведенная же во многих учебниках, учебных пособиях и работах для этих случаев формула

$$m_{\text{общ.}} = \sqrt{m^2_{\text{случ.}} + m^2_{\text{сист.}}}$$

является формальной и бесполезной по крайней мере для инженерной практики.

Таким образом, исключая из результатов систематические ошибки путем введения соответствующих поправок, измеренные значения параметров должны рассматриваться как функции непосредственно измеренных величин с учетом точности определения поправок и функциональных закономерностей, которым они подчиняются. Составляющие параметров при этом могут быть подразделены по характеру их использования на коррелирующие (участвующие в образовании нескольких параметров) и коррелируемые (участвующие в образовании отдельных параметров).

Из изложенного следует, что строгое решение задач оценки места по зависимым параметрам, содержащим систематические ошибки (поправки), может быть найдено двумя путями — используя общепринятый аппарат способа наименьших квадратов применительно к независимым составляющим параметров и используя аппарат обобщенного (расширенного) способа наименьших квадратов применительно к зависимым навигационным параметрам.

Задача оценки точности места при отсутствии избыточных измерений сформулирована в работе как задача определения корреляционной матрицы координат определяемого места с последующим вычислением интересующих характеристик точности («эллиптической» ошибки, средней квадратической (круговой) ошибки места, ошибок координат и др.).

Разработаны прямой и косвенный методы (каждый в двух вариантах) определения корреляционной матрицы координат места. Прямой метод оценки места основывается на непосред-

ственном использовании правила переноса ошибок, которое применительно к оцениваемым координатам имеет вид

$$K_P = FKF^* = m_0^2 FQF^*$$

где K_P — искомая корреляционная матрица координат места,

F — матрица преобразования, составленная из частных производных от оцениваемых координат по результатам измерений (по независимым составляющим параметров или по параметрам),

K — корреляционная матрица результатов измерений (диагональная матрица квадратов ошибок независимых составляющих или корреляционная матрица параметров),

Q — матрица весовых коэффициентов, пропорциональная матрице K ,

m_0 — средняя квадратическая ошибка единицы веса.

Косвенный метод оценки места основывается на использовании числимых (приближенных) значений определяемых величин.*

В этом случае искомая корреляционная матрица находится путем обращения матрицы коэффициентов нормальных уравнений поправок

$$K_P = m_0^2 N^{-1} = m_0^2 (B^*PB)^{-1}$$

где N — матрица коэффициентов нормальных уравнений поправок,

B — матрица коэффициентов уравнений погрешностей,

$P = Q^{-1}$ — весовая матрица результатов измерений.

Во всех четырех вариантах получены конечные выражения для элементов корреляционной матрицы координат определяемого места.

Все четыре способа дают тождественные результаты.

Приведен числовой пример.

Конечные выражения корреляционной матрицы координат определяемого места могут быть представлены во всех четы-

* При использовании в качестве результатов измерений навигационных параметров определяемыми величинами являются координаты места. При использовании в качестве результатов измерений независимых составляющих определяемыми величинами являются, кроме координат места, коррелирующие составляющие, в частности, поправки (систематические ошибки), при этом за числимые значения поправок (систематических ошибок) целесообразно принимать их измеренные значения.

рех вариантах в виде суммы матрицы, вычисляемой в предположении о независимости параметров и матрицы, отражающей влияние взаимозависимости параметров. Представление результирующей матрицы в виде суммы позволяет дать всесторонний анализ влияния взаимозависимости параметров в каждом конкретном случае определения места.

В работе подробно анализируется влияние взаимосвязи параметров на точность определения места, оцениваемую круговой ошибкой. С этой целью рассчитана таблица отношений круговых ошибок, вычисленных с учетом (M) и без учета ($M_{\text{нез}}$) взаимосвязи параметров по формуле

$$\frac{M}{M_{\text{нез}}} = \sqrt{1 - \frac{2r}{1+r^2} k \cos \Delta\tau},$$

где r — отношений модулей градиентов параметров,

k — коэффициент корреляции,

$\Delta\tau$ — угол пересечения изолиний параметров.

Анализ таблицы показал, что влияние взаимосвязи параметров существенно при неблагоприятных геометрических условиях определений, а также при относительно малой точности определения коррелирующих составляющих параметров. Это влияние незначительно и пренебрегаемо при использовании ориентиров, разность направлений на которые близка к прямому углу, при сравнительно высокой точности определения коррелирующих составляющих, а также при значительно отличающихся по модулю градиентах параметров.

Рассчитанная таблица может быть использована для перерасчета круговой ошибки, полученной без учета зависимости параметров в круговую ошибку, учитывающую эту зависимость. Учитывая большое количество опубликованных таблиц, номограмм и других вспомогательных средств для расчета ошибки места по независимым параметрам, приведенная таблица позволит быстро и с достаточной точностью вычислять ошибку места с учетом взаимосвязи параметров.

Спорным в свое время являлся вопрос о наивыгоднейшем угле пересечения изолиний параметров, отягощенных случайными и повторяющимися ошибками, угле, при котором достигается минимум круговой ошибки.

Рассчитана таблица наивыгоднейших углов пересечения изолиний $\Delta\tau_{\text{min}}$ безоотносительно к типу используемых зависимых параметров. Таблица рассчитана по формуле

$$\cos \Delta\tau_{\text{min}} = \frac{1}{2k} \left(r + \frac{1}{r} \right) \pm \sqrt{\frac{1}{4k^2} \left(r + \frac{1}{r} \right)^2 - 1}.$$

Полученные результаты подтвердили исследования Б. А. Мальцева и В. Т. Кондрашихина, проведенные применительно к параметрам, градиенты которых равны единице.

Анализ формулы и таблицы показал, что чем теснее связь между параметрами, тем больше наивыгоднейший угол отличается от 90° . В то же время при использовании параметров, существенно (в 2 и более раз) отличающихся между собой по модулю, этот угол, даже при значительной корреляции, близок к прямому.

Во второй главе рассмотрены возможные рациональные способы уравнивания зависимых навигационных параметров.

На примере определения места по истинным пеленгам трех ориентиров показано, что строгое решение задач оценки места при зависимых параметрах с учетом их систематических ошибок может быть получено не только используя теорию уравнивания зависимых результатов измерений (обобщенный способ наименьших квадратов), но и используя аппарат классического способа наименьших квадратов применительно к независимым составляющим параметров.

Оба возможные пути строгого уравнивания рассмотрены в работе в двух вариантах: уравнивание методом условий и методом косвенных определений.

При уравнивании методом условий по классической схеме способа наименьших квадратов использовано условное уравнение поправок

$$a_1 v_{K_1} + a_2 v_{K_2} + a_3 v_{K_3} + a_4 v_{\Delta} + w = 0.$$

где a_1, a_2, a_3, a_4 — коэффициенты условного уравнения;

$v_{K_1}, v_{K_2}, v_{K_3}, v_{\Delta}$ — поправки независимых составляющих истинных пеленгов — поправки компасных пеленгов K_1, K_2, K_3 и поправки компаса Δ ,

w — невязка условного уравнения.

Поправки определяются по формуле

$$v_i = \frac{1}{p_i} a_i k.$$

где $k = -w : \left[\frac{1}{p} aa \right]$, p_i — веса компасных пеленгов и поправки компаса.

При уравнивании того же примера методом косвенных определений уравнения погрешностей имеют вид

$$\begin{aligned} \delta\Delta &= v_{\Delta} \text{ с весом } p_{\Delta} \\ -\delta\Delta + a_1 \delta x + b_1 \delta y + l_1 &= v_{K_1} \text{ с весом } p_{K_1} \\ -\delta\Delta + a_2 \delta x + b_2 \delta y + l_2 &= v_{K_2} \text{ с весом } p_{K_2} \\ -\delta\Delta + a_3 \delta x + b_3 \delta y + l_3 &= v_{K_3} \text{ с весом } p_{K_3} \end{aligned}$$

где δx , δy , $\delta\Delta$ — поправки к счислимым значениям определяемых величин — координатам места и поправки компаса. Здесь за счислимое значение поправки компаса принято ее измеренное значение.

Искомые поправки находятся из решения соответствующих нормальных уравнений, которые при равноточных компасных пеленгах имеют вид

$$\begin{aligned} (3+p) \delta\Delta - [a] \delta x - [b] \delta y - [w] &= 0 \\ -[a] \delta\Delta + [aa] \delta x + [ab] \delta y + [aw] &= 0 \\ -[b] \delta\Delta + [ab] \delta x + [bb] \delta y + [bw] &= 0 \end{aligned}$$

При использовании аппарата обобщенного способа наименьших квадратов, корреляционная матрица зависимых параметров может быть установлена по правилу переноса ошибок.

При уравнивании методом условий условное уравнение поправок зависимых истинных пеленгов имеет вид

$$a_1 v_{и1} + a_2 v_{и2} + a_3 v_{и3} + w = 0.$$

Поправки к истинным пеленгам находятся по формуле

$$V = QA^*k$$

где Q — матрица весовых коэффициентов истинных пеленгов, A — матрица коэффициентов условного уравнения, $k = -N^{-1} w = -(AQA^*)^{-1} w$.

При уравнивании методом косвенных определений уравнения погрешностей в матричной записи имеют вид

$$BX + L = 0$$

где B — матрица коэффициентов;
 X — вектор поправок;
 L — вектор свободных членов.

Вектор поправок определяется по формуле

$$X = -N^{-1} W$$

где $N = B^*Q^{-1}B$, $W = B^*Q^{-1}L$.

Оценка точности места во всех четырех методах выполняется по известным правилам способа наименьших квадратов.

Дан подробный анализ применяемых в настоящее время способов уравнивания зависимых параметров. Отмечена правильность предложенных В. Т. Кондрашихиным, В. А. Коугией, В. В. Вейхманом и М. И. Скворцовым методов уравнивания параметров, «отягощенных случайными и повторяющимися ошибками».

Показано, что включение в уравниваемую совокупность остаточных, после исключения систематических ошибок, погрешностей без учета веса введенных в параметры поправок приводит к искажению получаемых результатов. Также к искажению результатов приводит и переход от истинных пеленгов и их разностям, вследствие того, что при этом уменьшается число степеней свободы (исключается измеренная поправка компаса).

Во второй главе рассмотрены также некоторые частные случаи уравнивания зависимых параметров.

Разработан простой графический способ определения места в случае равномерного расположения ориентиров по горизонту. Способ заключается в последовательном откладывании переносов линий положения, и делением отрезка, соединяющего счислимое место M_c с последней определяющей точкой K_n в отношении $M_c M_0 = \frac{2 M_c K_n}{n}$,

где M_0 — обсервованное место,
 n — число параметров.

В третьей главе дан подробный анализ применяемых в гидрографическом производстве способов уравнивания полигонов вех, определенных фазовыми радионавигационными системами.

Показано, что эти способы являются приближенными, нестрогими, вследствие неучета зависимости уравниваемых приращений расстояний в случае использования радиолога, или приращений разностей расстояний в случае использования фазового зонда.

Изложено уравнивание полигонов вех в приращениях с использованием аппарата обобщенного способа наименьших квадратов.

Разработан способ уравнивания полигонов вех в показаниях фазометров. Суть способа поправок средних значений состоит в том, что, используя уклонения частных отсчетов (показаний фазометров) у каждой вехи от их средних значений, последовательными приближениями находятся поправки в начальные отсчеты каждого пробега и одновременно находятся поправки к средним значениям отсчетов.

Уравнивание показаний фазометров по каждому в отдельности каналу производится в следующей последовательности.

$$1. \Theta_{oi} = [\rho \cdot \Theta]_i : [\rho]_i; \quad v_i = \Theta_{oi} - \Theta_i;$$

$$2. \omega_{oj} = [\rho \cdot v]_j : [\rho]_j;$$

$$3. (\Delta_1 \Theta)_i = [\rho \cdot \omega_o]_i : [\rho]_i;$$

$$4. \omega_{1j} = [\rho \cdot \Delta_1 \Theta]_j : [\rho]_j;$$

$$5. (\Delta_2 \Theta)_i = [\rho \cdot \omega_1]_i : [\rho]_i;$$

$$6. \omega_{2j} = [\rho \cdot \Delta_2 \Theta]_j : [\rho]_j \text{ и т. д.}$$

$$\Theta_{\text{уравн.}} = \Theta_o + [\Delta \Theta] + \Delta$$

где $\Delta = [\rho \cdot \Delta]_{\text{исходн.}} : [\rho]_{\text{исходн.}}$

В этих формулах: Θ — показания фазометров (отсчеты) на вехах; ρ — веса отсчетов, равные числу отсчетов, участвовавших в осреднении; ω — поправки в начальные отсчеты пробегов или промерных галсов; $\Delta \Theta$ — поправки в средневзвешенные отсчеты на вехах; Δ — поправки за приравнивание к исходным данным (координатам исходных вех, полученным из привязки к береговой опорной сети); i — номера вех; j — номера пробегов или промерных галсов.

При отсутствии избыточных исходных данных способ поправок средних значений приводит к строгим результатам, а по трудоемкости равнозначен практикуемому в настоящее время приближенному способу уравнивания в приращениях.

При наличии избыточных исходных данных результаты уравнивания способом поправок искажаются несущественно, во всяком случае, искажения уравненных величин значительно меньше искажений, приносимых в результаты, вследствие неучета взаимозависимости приращений.

Изложенные в работе способы уравнивания полигонов вех подробно иллюстрированы числовыми примерами.

Заключение

Основным результатом, полученным в итоге проведенных исследований, является решение научно-технической проблемы обработки зависимых навигационных параметров с учетом систематических ошибок.

А. Общие выводы и положения диссертационной работы сводятся к следующему.

1. Используемые для оценки места навигационные параметры, как правило, являются взаимозависимыми величинами. Взаимозависимость параметров порождается общностью условий, при которых производятся измерения параметров (общностью внешней среды, прибора, наблюдателя и пр.).

2. Наиболее распространенным источником тесной взаимосвязи параметров являются операции по исключению общих систематических ошибок из результатов измерений, а также операции приведения разновременных наблюдений к одному моменту времени, месту или зениту наблюдателя. Эти операции можно свести к более общему случаю, а именно, выявлению функциональной зависимости используемых параметров от одних и тех же непосредственно измеренных величин (составляющих параметров). По характеру использования составляющие параметров могут быть подразделены на коррелирующие и коррелируемые.

3. Имеющиеся в литературе по гидрографии и судовождению формулы и правила определения характеристик связи параметров (корреляционных моментов, коэффициентов корреляции или корреляционной матрицы) справедливы лишь для части параметров, а именно, для параметров, представляющих собой алгебраическую сумму независимых величин. Изложенный в работе общий прием определения корреляционной матрицы, основывающийся на правиле переноса ошибок, пригоден для параметров любого вида.

4. Задача оценки места по зависимым навигационным параметрам тесно связана с мало изученной проблемой учета

при оценке места систематических ошибок. Потребность в детальной разработке этой проблемы особенно остро ощущается в гидрографии, навигации, мореходной астрономии, где систематические ошибки и остаточные, после исключения систематических ошибок, погрешности по своей величине сравнимы, а зачастую и превышают случайные ошибки измерений. Несмотря на большой объем выполненных теоретических и экспериментальных исследований, эта проблема не получила еще должного освещения и продолжает оставаться в центре внимания гидрографов и судоводителей. Рекомендации и выводы, содержащиеся в научной литературе и, в частности, в диссертационных работах, а также в учебниках, учебных пособиях, практических руководствах и справочниках отличаются большим разнообразием, зачастую противоречивы и нередко приводят к заметно отличающимся между собой результатам.

Принятое в работе определение систематической ошибки, как случайной составляющей общей погрешности результата измерения, имеющей своим источником влияющую физическую величину и обладающей отличным от нуля математическим ожиданием, позволило уточнить ряд спорных вопросов, а также отказаться от некоторых существующих формальных положений.

5. Доказано, что широко используемый в гидрографии и судовождении признак выделения систематических ошибок, основывающийся на анализе характера изолированного воздействия рассматриваемой ошибки на определяемое место, несостоятелен.

Показано, что участие в образовании нескольких параметров одних и тех же измеренных величин и обусловленная этим участием корреляция параметров не может служить основанием для причисления ошибок этих величин («повторяющихся» ошибок) к систематическим.

Остаточные, после исключения систематических ошибок, погрешности (погрешности определения поправок) по своим свойствам являются типично случайными ошибками с нормальным или приближенно нормальным распределением.

6. Задача оценки места по двум и более зависимым параметрам может быть строго решена как с использованием общепринятого аппарата способа наименьших квадратов по так называемой «классической схеме способа наименьших квадратов», так и с привлечением аппарата теории уравнивания за-

висимых величин (обобщенного способа наименьших квадратов).

В первом случае в качестве уравниваемых величин выступают независимые составляющие параметров, при этом поправки, введенные в параметры для исключения систематических ошибок, должны рассматриваться как определяемые и как измеренные величины с учетом их ошибок, а также с учетом функциональных закономерностей, которым они подчиняются.

Во втором случае в качестве уравниваемых величин используются навигационные параметры, при этом необходимая для решения корреляционная матрица параметров в большинстве случаев может быть установлена по правилу переноса ошибок.

7. Неучет при оценке места остаточных, после исключения систематических ошибок, погрешностей или неучет взаимозависимости параметров, (что равносильно), приводит к искажению получаемых результатов.

Переход от исправленных поправками параметров к любым функциям этих параметров с целью исключения «остаточных» ошибок, введенных в параметры поправок, равно как и включение этих «остаточных» ошибок в число неизвестных при оценке места без учета их веса, также приводят к искажению получаемых результатов.

8. Примером приближенного способа уравнивания, вследствие неучета взаимозависимости уравниваемых величин являются применяемые в настоящее время в гидрографическом производстве способы уравнивания полигонов вех и промерных галсов.

Строгое уравнивание полигонов вех и промерных галсов может быть выполнено как в приращениях, так и в показаниях фазометров с использованием метода наименьших квадратов.

Б. К основным научно-техническим результатам, полученным в диссертационной работе, может быть отнесено следующее.

1. Разработано в двух вариантах строгое уравнивание зависимых навигационных параметров с включением в уравниваемые величины коррелирующих составляющих параметров, в том числе систематических ошибок. Также в двух вариантах изложено строгое решение задач оценки места по зависимым параметрам с использованием аппарата формул обобщенного способа наименьших квадратов.

2. Разработаны в четырех вариантах детальные схемы оценки точности места, определенного по двум зависимым параметрам.

3. Дан подробный анализ влияния взаимозависимости параметров на точность определения места, оцениваемую круговой ошибкой. Показано, что этим влиянием в производственных условиях во многих случаях можно пренебречь при соблюдении инструктивных положений о выборе ориентиров, а также при относительно высокой точности определения коррелирующих составляющих и при значительно отличающихся по модулю градиентах параметров. Влияние взаимозависимости параметров сказывается существенным образом при оценке места, определенного при неблагоприятных геометрических условиях обсервации (при углах между изолиниями параметров, резко отличающихся от прямого), а также при сравнительно малой точности определения коррелирующих составляющих параметров.

4. Рассмотрено уравнивание полигонов вех в приращениях с учетом их взаимозависимости с использованием аппарата обобщенного способа наименьших квадратов. Предложен эффективный способ уравнивания полигонов вех в показаниях фазометров — способ поправок средних значений.

5. Получены несложные формулы для оценки места при условии равномерного расположения ориентиров по горизонту. Разработан для этих случаев простой графический прием уравнивания параметров, позволяющий значительно сократить объем графических построений.

6. Определены области применения практикуемых приближенных способов оценки места по зависимым параметрам.

7. Обобщены на различные типы зависимых параметров наивыгоднейшие (по критерию минимума круговой ошибки) условия определения места.

8. Предложен табличный способ расчета ошибки места с учетом взаимозависимости параметров; способ, позволяющий расширить круг применения существующих многочисленных таблиц, номограмм и других вспомогательных средств, ограниченный в настоящее время областью независимых или слабо зависимых параметров.

В настоящее время среди мероприятий, направленных на повышение качества гидрографических и навигационных работ, важное место отводится внедрению в производство более совершенных методов обработки навигационной информации. Эффективным направлением в этой области является выявление

взаимозависимости результатов измерений и учет этой взаимозависимости при решении конкретных задач гидрографии и судовождения.

Выполненное исследование может быть полезным в части выбора рациональных способов обработки зависимых результатов измерений с учетом их систематических ошибок.

Основные результаты диссертации изложены в докладах на научно-технических конференциях профессорско-преподавательского состава и молодых специалистов ЛВИМУ в 1970—1973 годах и содержатся в следующих работах:

1. Никифоров Б. И., Макаров Г. В. Обработка измерений, произведенных способом круговых приемов. Известия вузов, раздел «Геодезия и аэрофотосъемка», вып. 6, 1968.

2. Макаров Г. В., Запасский С. И., Никифоров Б. И. Об уравнивании полигонов вех морского промера при использовании фазового зонда. Научно-техн. сб. «Судовождение», вып. 11, Л., «Транспорт», 1970.

3. Макаров Г. В. Об оценке точности местоположения вех при промере с помощью фазового зонда. Научно-техн. сб. «Судовождение», вып. 12, Л., «Транспорт», 1972.

4. Никифоров Б. И., Макаров Г. В. Оценка точности гидрографических определений. Л., ЛВИМУ им. адм. С. О. Макарова, 1972.

5. Макаров Г. В. Уравнивание полигонов вех, определенных ФРНС, способом поправок средних значений. Сб. трудов «Гидрография и гидрометеорология», вып. 1, Л., 1972.

М-05698. Подп. к печати 5.9.73 г. Сдано в набор 23.7.73 г.
Зак. 125. Тир. 150. Объем 1¹/₄ п. л. Бесплатно.

Типография ЛВИМУ. Ленинград, В-111. Косая лин., 15-а.