

ПЕРЕБОРНЫЙ МЕТОД РАЗРЕШЕНИЯ НЕОДНОЗНАЧНОСТИ В МНОГОШКАЛЬНОЙ ФАЗОВОЙ РАДИОНАВИГАЦИОННОЙ СИСТЕМЕ*

Рассмотрен алгоритм однозначного определения координат объектов по результатам измерения фазовых сдвигов на пяти метрических частотах радионавигационной системы «Крабик», предназначенной для морских потребителей. Однозначный отсчет радионавигационного параметра реализуется за счет использования переборного метода разрешения фазовой неоднозначности и выбора максимально правдоподобной оценки координат. Показано, что решение поставленной задачи достигается при обеспечении избыточности в системе уравнений, предназначенной для определения координат объектов. Проведен расчет вероятности правильного разрешения неоднозначности в зависимости от среднеквадратической погрешности измерения фазовых сдвигов принимаемых сигналов на метрических частотах системы «Крабик».

Ключевые слова: радионавигационные системы, разрешение неоднозначности, вероятность.

При вождении судов на опасных участках: в каналах, узкостях, шхерах и устьях судоходных рек – требуется высокоточное и оперативное навигационное обеспечение надводных объектов, осуществляемое с помощью радионавигационных систем (РНС) с береговым базированием опорных навигационных пунктов. Высокая точность таких РНС достигается за счет применения фазовых методов измерения радионавигационных параметров (РНП).

Примером РНС наземного базирования, использующей фазовые методы определения РНП, является РНС «Крабик», разработка и серийный выпуск которой с 2001 г. осуществляется предприятием ФГУП «НПП «Радиосвязь» (Красноярск) совместно с Сибирским федеральным университетом.

В состав РНС «Крабик» входят 3...6 опорных станций (ОС), размещенных на берегу в точках с известными координатами. РНС обеспечивает определение координат бортовых станций (БС) в дальномерном, разностно-дальномерном и комбинированном режимах определения места [1].

В настоящее время частотный план РНС «Крабик» задан следующими значениями несущих частот: $f_0 = 421$ МГц – основная несущая частота; $f_1 = 421,01$ МГц, $f_2 = 421,1$ МГц, $f_3 = 422$ МГц, $f_4 = 426$ МГц, $f_5 = 431$ МГц – вспомогательные несущие частоты. Значения фазовых сдвигов (ФС) измеряются ортогональным фазометром с ограниченными сигналами [2], выполняющим оценку ФС принимаемых сигналов по отношению к их копиям, сформированным синтезатором частоты принимающей станции. Измеренные значения ФС оказываются пропорциональными измеряемым значениям радионавигационных параметров: дальностей БС–ОС – в дальномерном режиме работы, разностям дальностей – в разностно-дальномерном режиме, разностям и суммам дальностей – в комбинированном режиме.

С целью уменьшения систематических погрешностей измерений отсчет значений ФС осуществляется на разностных (метрических) частотах РНС, получаемых путем вычитания основной несущей частоты f_0 из значений вспомогательных частот $f_1...f_5$. В результате этого сетка метрических частот образует следующий ряд значений:

$$\begin{aligned} F_{m_1} &= f_1 - f_0 = 10 \text{ кГц}, \\ F_{m_2} &= f_2 - f_0 = 100 \text{ кГц}, \\ F_{m_3} &= f_3 - f_0 = 1 \text{ МГц}, \\ F_{m_4} &= f_4 - f_0 = 5 \text{ МГц}, \\ F_{m_5} &= f_5 - f_0 = 10 \text{ МГц}. \end{aligned} \quad (1)$$

Определение РНП осуществляется на самой высокой метрической частоте F_{m_5} , значение которой составляет 10 МГц. Диапазон однозначных измерений РНП для сигнала частоты F_{m_5} соответствует длине волны данного сигнала, которая составляет около 30 м. Процедура нахождения целого числа длин волн, укладывающихся в отсчетном значении РНП, называется разрешением неоднозначности (РН) фазовых измерений.

Для РН может быть применен известный метод перебора измерений (МПИ), описанный в [3]. Определение значения полного фазового сдвига на самой высокой метрической частоте F_{m_5} осуществляется путем последовательного перехода от грубых ступеней РН к самой точной ступени, характеризующейся минимальным значением периода неоднозначности.

Грубые ступени РН характеризуются большими значениями длины волны λ_i и, следовательно, большими значениями периода однозначных измерений. Согласно МПИ, переход от грубых к точным ступеням РН осуществляется с использованием соотношений

$$\Phi_i = N_i + \varphi_i, \quad (2)$$

$$N_i = \left[\frac{\lambda_{i-1}}{\lambda_i} \cdot \Phi_{i-1} - \varphi_i + 0,5 \right], \quad (3)$$

где $i = 1, \dots, m$ – номер текущей шкалы; m – общее число шкал, для РНС «Крабик» равно 5; $[\dots]$ означает операцию выделения целой части числа; λ_i – длина волны сигнала на текущей шкале; φ_i – значение измеренного ФС на i -й шкале, выраженное в фазовых циклах; $i-1$ – номер предыдущей шкалы с длиной волны λ_i ; Φ_{i-1} – значение полного ФС, полученного на предыдущей шкале; N_i – значение целочисленной неоднозначности для i -й шкалы; Φ_i – значение полного ФС на текущей шкале.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 08-08-00849).

Длины волн в (3) определяются по значениям метрических частот $F_{m_1} \dots F_{m_5}$ как

$$\lambda_i = \frac{V}{F_{m_i}}, \quad (4)$$

где $i = 1, \dots, 5$ – номер метрической частоты РНС «Крабик»; V – значение скорости распространения радиосигналов.

С учетом (4) значения неоднозначностей (3) могут быть определены следующим образом:

$$N_i = \left[\frac{F_{m_i}}{F_{m_{i-1}}} \cdot \Phi_{i-1} - \Phi_i + 0,5 \right]. \quad (5)$$

Использование формулы (3) или (5) совместно с (2) позволяет реализовать процедуру РН с целью нахождения полного ФС Φ_5 для самой высокой метрической частоты РНС «Крабик» F_{m_5} . Значение полного ФС Φ_5 впоследствии может использоваться для вычисления измеренных значений РНП.

Одной из серьезных проблем при разрешении фазовой неоднозначности в РНС «Крабик» является наличие многозначных отсчетов на самой низкой метрической частоте F_{m_1} , равной 10 кГц, длина волны которой составляет 30 км. В результате этого отсчеты РНП могут быть получены в пределах 0...30 км, в то время как для рабочей зоны РНС, равной 150 км, значение двойной дальности может достигать 300 км. Для получения однозначного отсчета требуется задание априорных значений РНП с погрешностью ± 15 км. Если же в качестве априорных данных вводятся координаты БС, то для определения места РНС в дальномерном режиме предельная погрешность не должна превышать $\pm 7,5$ км. Однако выполнение указанных требований не всегда осуществимо на практике.

Для получения однозначного отсчета РНП без необходимости задания априорных координат БС и изменения частотного плана РНС может быть использован переборный метод определения целого числа циклов первой метрической частоты 10 кГц для измеренного значения РНП.

Переборные методы находят применение при определении угловой ориентации по сигналам спутниковых радионавигационных систем [4–6], однако использование данных методов для решения задач определения координат объектов по сигналам многошкальных РНС в литературе освещено недостаточно.

В частности, имеется публикация [7], посвященная РНС сверхдлинноволнового диапазона, где упоминается возможность аналитического разрешения неоднозначности путем подбора целых циклов в измеренных значениях ФС, однако при этом отмечается высокая вычислительная сложность данной процедуры.

Следует отметить, что при реализации переборных методов определения угловой ориентации согласно [4–6] для выбора оптимальных значений фазовой неоднозначности используется критерий максимального правдоподобия. В связи с этим при реализации переборного метода РН для многошкальных РНС также целесообразно использовать критерий максимума функции правдоподобия.

При нормальном законе распределения погрешностей измерения ФС [8; 9] поиск максимума функции правдоподобия сводится к минимизации показателя ее экспо-

ненты, называемого квадратом суммарной невязки. При независимости [10] и равноточности измерений ФС суммарная невязка $Q(x, y)$ может быть определена по формуле

$$Q(x, y) = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\lambda_i \cdot (k_{1i} + \Phi_{1i})}{2} - \sqrt{(x_{o_{c_i}} - x)^2 + (y_{o_{c_i}} - y)^2} \right)^2}, \quad (6)$$

где $i = 1, \dots, n$ – текущий номер принимающей ОС; n – общее число ОС; λ_1 – длина волны первой метрической частоты 0,01 МГц; k_{1i} – перебираемые неоднозначности ФС на первой метрической частоте для i -й ОС; Φ_{1i} – значения ФС на первой метрической частоте; x_i, y_i – известные координаты i -й ОС; x, y – координаты БС.

При использовании результатов измерений ФС на всех метрических частотах значение суммарной невязки $Q(x, y)$ определяется следующим образом:

$$Q(x, y) = \sqrt{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^5 \left(\frac{\lambda_j \cdot (k_{ji} + \Phi_{ji})}{2} - \sqrt{(x_{o_{c_i}} - x)^2 + (y_{o_{c_i}} - y)^2} \right)^2}, \quad (7)$$

где $j = 1, \dots, 5$ – номер фазовой дорожки, заданной метрической частотой F_{m_j} ; k_{ji} – целочисленная неоднозначность ФС i -й станции на j -й метрической частоте; λ_j – длина волны сигнала j -й метрической частоты; Φ_{ji} – измеренное значение ФС для i -й ОС на j -й метрической частоте.

Для расчета суммарной невязки использовались исходные данные по координатам расстановки ОС и БС, приведенные в таблице.

При заданных значениях координат БС, приведенных в нижней строке таблицы, дальности БС–ОС1 (R_1) и БС–ОС2 (R_2) составляют соответственно 50 000,56 и 54 000,81 м. Значения суммарной невязки $Q(x, y)$ вычислялись по выражению (7) в диапазоне дальностей R_1 и R_2 от 2 до 102 км с шагом 1 км, т. е. значения суммарной невязки $Q(x, y)$ были вычислены в 10^4 точках. При проведении расчетов дальности отбирались и по условиям их реализуемости, а именно: сумма полученных дальностей $R_1 + R_2$ должна быть не меньше расстояния между ОС1 и ОС2. По полученным значениям дальностей определялись координаты БС для проверяемой точки и значения дальностей для ОС3–ОС6.

Полученная расстановка ОС, истинное положение БС и положения БС для расчета суммарной невязки приведены на рис. 1, а.

Представленные на рис. 1, б, в, г зависимости суммарной невязки от дальностей R_1 и R_2 позволяют сделать вывод о том, что при работе по сигналам двух ОС разрешение неоднозначности методом максимального правдоподобия невозможно, поскольку все минимумы функции правдоподобия одинаковы по своим значениям и равны нулю. С увеличением числа ОС значения суммарной невязки в побочных минимумах увеличиваются, в то время как в основном минимуме значение суммарной невязки при отсутствии погрешности измерения ФС остается постоянным и равным нулю. При этом в значении суммарной невязки при числе ОС больше двух наблюдается один минимум, соответствующий истинному положению БС (см. рис. 1, в, г).

Следует отметить, что прямой перебор неоднозначностей на всех метрических частотах требует больших

временных затрат (число перебираемых неоднозначностей составляет 10^{4n} для частоты 10 МГц в рабочей зоне 0...150 км). В связи с этим целочисленные неоднозначности k_{ji} на метрической частоте 10 кГц могут быть определены путем перебора, а на остальных метрических частотах – по МПИ независимо для каждого из РНП. В этом случае для получения отсчета потребуется анализ 121 решения, что существенно сокращает время вычисления.

Важным критерием качества алгоритмов разрешения неоднозначности является вероятность правильного разрешения неоднозначности, позволяющая судить о достоверности получаемых оценок координат объектов.

При независимости измеренных значений радионавигационных параметров вероятность правильного определения места БС находится в соответствии с выражением

$$P_{\Sigma} = P_1 \cdot P_2 \cdot \dots \cdot P_n, \quad (8)$$

где P_1, P_2, \dots, P_n – вероятности правильного РН при определении значений радионавигационных параметров; n – общее число РНП, использованных для определения места БС.

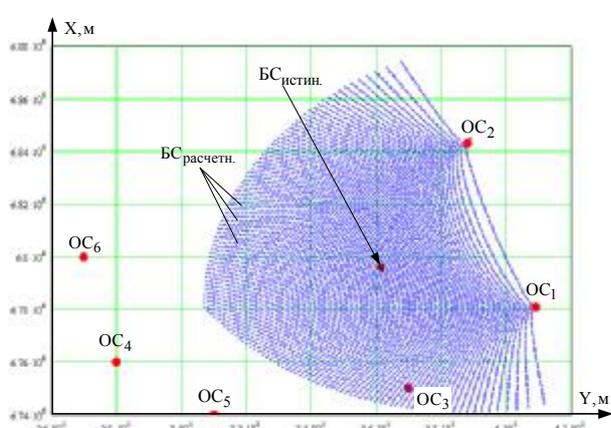
С целью упрощения дальнейшего анализа можно положить измерения фазовых сдвигов по сигналам разных ОС равноточными. В этом случае выражение (8) может быть представлено в виде

$$P_{\Sigma} = P^n, \quad (9)$$

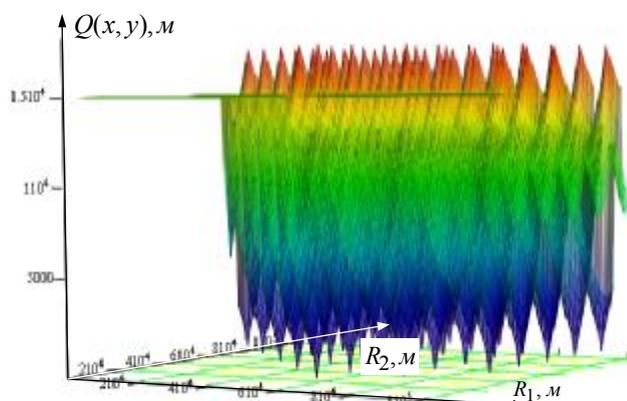
поскольку $P_1 = P_2 = \dots = P_n = P$.

Вероятность правильного РН при оценке одного РНП определяется в соответствии с выражением [10]:

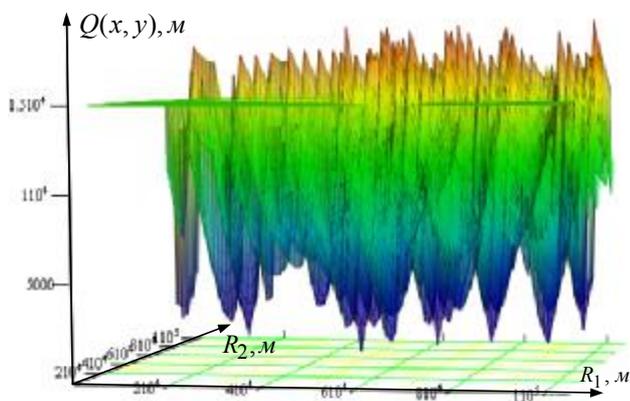
$$P = \frac{\sqrt{|C|}}{(2\pi)^2} \cdot \int_{-0,5}^{0,5} \int_{-0,5}^{0,5} \int_{-0,5}^{0,5} \int_{-0,5}^{0,5} e^{-0,5 \cdot (\Delta^T \cdot C \cdot \Delta)} d\Delta_1 d\Delta_2 d\Delta_3 d\Delta_4, \quad (10)$$



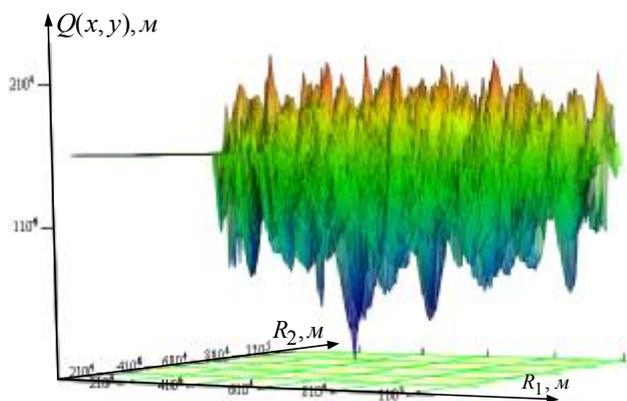
а



б



в



г

Рис. 1. Результаты расчета суммарной невязки в зависимости от координат БС:

а – расстановка БС и ОС при проведении расчетов; б – суммарная невязка, полученная по сигналам двух ОС; в – суммарная невязка, полученная по сигналам трех ОС; г – суммарная невязка, полученная по сигналам шести ОС

Координаты объектов, использованные при моделировании

Станция	Координата X, м	Координата Y, м
ОС1	6 780 852	409 077
ОС2	6 843 114	387 945
ОС3	6 750 000	370 000
ОС4	6 760 000	280 000
ОС5	6 740 000	310 000
ОС6	6 800 000	270 000
БС	6 796 062	361 446

где $C = K_{\Delta}^{-1}$ – матрица, обратная корреляционной матрице K_{Δ} , характеризующей корреляционные связи между ступенями РН; $\Delta_i = k_i \cdot \Delta\varphi_{i-1} - \Delta\varphi_i$ – погрешность РН, обусловленная погрешностями измерения ФС $\Delta\varphi_i$ и $\Delta\varphi_{i-1}$ на i -й и $(i-1)$ -й метрических частотах соответственно.

При взаимной независимости и равноточности измерений ФС на разных метрических частотах по сигналам разных опорных станций матрица K_{Δ} имеет вид [4]:

$$K_{\Delta} = \begin{pmatrix} \sigma_{\varphi}^2 \cdot (k_2^2 + 1) & -k_3 \cdot \sigma_{\varphi}^2 & 0 & 0 \\ -k_3 \cdot \sigma_{\varphi}^2 & \sigma_{\varphi}^2 \cdot (k_3^2 + 1) & -k_4 \cdot \sigma_{\varphi}^2 & 0 \\ 0 & -k_4 \cdot \sigma_{\varphi}^2 & \sigma_{\varphi}^2 \cdot (k_4^2 + 1) & -k_5 \cdot \sigma_{\varphi}^2 \\ 0 & 0 & -k_5 \cdot \sigma_{\varphi}^2 & \sigma_{\varphi}^2 \cdot (k_5^2 + 1) \end{pmatrix}, \quad (11)$$

где $k_2 = F_{m_2}/F_{m_1}$, $k_3 = F_{m_3}/F_{m_2}$, $k_4 = F_{m_4}/F_{m_3}$, $k_5 = F_{m_5}/F_{m_4}$ – коэффициенты сопряжения соседних шкал РНС; $F_{m_1}, F_{m_2}, F_{m_3}, F_{m_4}, F_{m_5}$ – значения метрических частот РНС, заданных в соответствии с выражением (1); σ_{φ} – среднее квадратическое отклонение погрешности измерения ФС, принятое одинаковым для всех метрических частот.

Результаты оценки вероятности правильного разрешения неоднозначности при определении места БС по

сигналам РНС «Крабик-БМ» в зависимости от среднеквадратического отклонения погрешности измерений ФС σ_{φ} для случаев работы по сигналам трех–шести ОС приведены ниже (рис. 2).

На графиках рис. 2 цифрами 1...3 обозначены следующие варианты РН:

– 1 – при определении места БС при независимой оценке РНП по МПИ (при этом неоднозначность по дорожке 10 кГц считается устраненной). В этом случае вероятность определения места БС рассчитывается в соответствии с выражением (9);

– 2 – при определении места БС во всей рабочей зоне путем перебора неоднозначностей для дорожки 10 кГц, РН для остальных метрических частот осуществляется по МПИ, выбор оптимального решения – по критерию (6);

– 3 – то же, что и график 2, только выбор оптимального решения осуществляется по критерию (7).

Значения оценок вероятности правильного разрешения неоднозначности для графиков 2 и 3 получены методом статистического моделирования по результатам обработки 1 000 отсчетов как статистических частот P^* , определяемых по формуле

$$P^* = m/n, \quad (12)$$

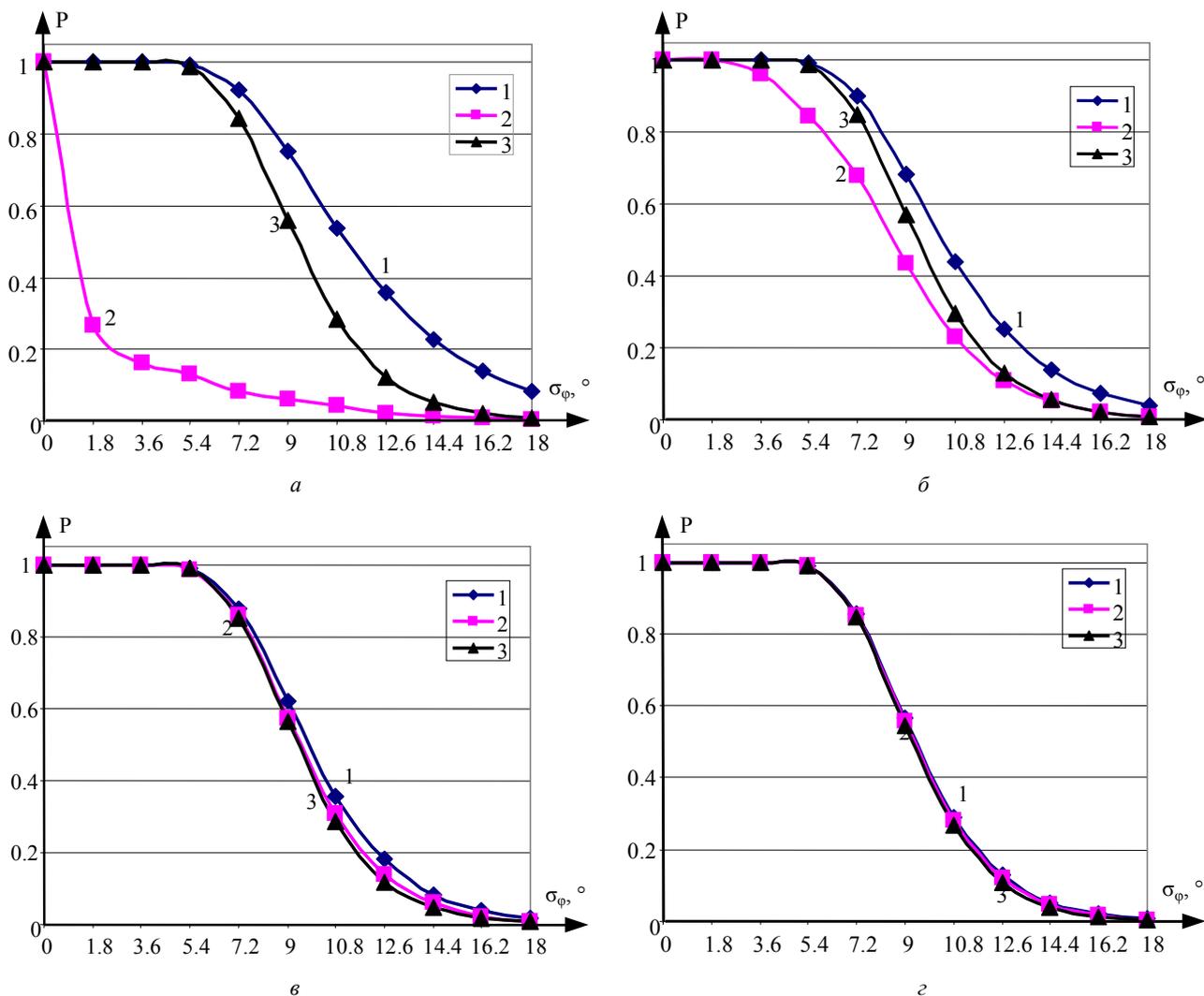


Рис. 2. Вероятность правильного разрешения неоднозначности при работе по вариантам 1–3 при работе по сигналам: а – трех ОС; б – четырех ОС; в – пяти ОС; г – шести ОС

где $n = 1\,000$ – общее число испытаний; m – число испытаний, в которых разрешение неоднозначности было выполнено правильно.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что использование при вычислении суммарной невязки $Q(x, y)$ измерений ФС на всех частотах обеспечивает повышение вероятности правильного разрешения неоднозначности при малом числе ОС (четырёх и особенно трёх ОС). При пяти и шести ОС существенной разницы между способами вычисления невязки не наблюдается, что объясняется влиянием ошибок в разрешении неоднозначности при оценке РНП по МПИ при переходе с частоты 10 кГц на частоту 10 МГц. Использование расчёта (7) по всем частотам обеспечивает повышение вероятности вследствие использования дополнительных измерений на других метрических частотах. При работе с большим числом ОС избыточность по результатам измерений имеется уже на одной метрической частоте, и при больших значениях среднеквадратической погрешности измерения ФС возникают ошибки разрешения неоднозначности по МПИ, которые влияют на результирующую вероятность правильного разрешения неоднозначности. Вероятность правильного разрешения неоднозначности по МПИ является верхней границей вероятности правильного разрешения неоднозначности для разработанного метода, основанного на переборе метрических частот на самой низкой метрической частоте 10 кГц.

Таким образом, полученные результаты подтверждают возможность правильного РН и однозначной оценки координат объектов в рабочей зоне РНС «Крабик». При этом не нужно задавать априорное место БС с погрешностью, не превышающей $\pm 7,5$ км, что требовалось в случае разрешения неоднозначности по МПИ. Необходимым условием реализации алгоритма является наличие избыточных ОС, используемых при определении координат БС. При этом вероятность правильного разрешения неоднозначности при работе по сигналам пяти-шести ОС приближается к верхней границе, задаваемой вероятностью правильного разрешения неоднозначности при независимой оценке РНП по методу пересчёта измерений.

Разработанный переборный метод разрешения неоднозначности может быть использован для определения координат объектов по сигналам морских фазовых РНС с

целью снижения требований к точности задания априорных координат БС. Другой областью применения данного метода является решение задач определения координат объектов в относительном фазовом режиме по сигналам спутниковых радионавигационных систем.

Библиографические ссылки

1. Высокоточная радионавигационная система для морских потребителей / А. М. Алешечкин, В. И. Кокорин, П. Н. Иванов и др. // Гирокоспия и навигация. 2004. № 2. С. 5–12.
2. Пат. 2048676. Рос. Федерация. Устройство для измерения фазы радиосигнала / Гумеров Р. Р. [и др.]. Оpubл. 1995, Бюл. № 32.
3. Разрешение неоднозначности в информационно-измерительных многошкальных приборах и системах / В. А. Пономарев, А. В. Пономарев, Т. М. Пономарева и др. СПб. : Изд-во Воен. инж.-космич. ун-та им. А. Ф. Можайского, 2001.
4. Pat. 4963889 USA. Method and Apparatus for Precision Attitude Determination and Kinematic Positioning / Hatch R. R. Publ. 16.10.90.
5. Pat. 5296861 USA. Method and Apparatus for Maximum Likelihood Estimation Direct Integer Search in Differential Carrier Phase Attitude Determination Systems / Knight D. T. Publ. 22.03.94.
6. Пат. 2379700 Рос. Федерация. Способ угловой ориентации объекта по сигналам спутниковых радионавигационных систем / Алешечкин А. М., Кокорин В. И., Фатеев Ю. Л. Оpubл. 20.01.2010, Бюл. № 2.
7. Радионавигационные системы сверхдлинноволнового диапазона / С. Б. Болошин, Г. А. Семенов, А. С. Гузман и др. М. : Радио и связь, 1985.
8. Денисов В. П., Дубинин Д. В. Фазовые радиопеленгаторы / Том. ун-т систем упр. и радиоэлектроники. Томск, 2002.
9. Алешечкин А. М. Повышение достоверности оценок радионавигационных параметров в радионавигационных системах с фазовыми датчиками // Датчики и системы. 2009. № 7. С. 25–29.
10. Алешечкин А. М. Вероятность правильного устраниения неоднозначности в фазовой радионавигационной системе «Крабик» // Гирокоспия и навигация. 2009. № 3. С. 74–82.

A. M. Aleshechkin

SEARCH METHOD OF AMBIGUITY RESOLUTION IN MULTI-SCALE PHASE RADIO-NAVIGATION SYSTEMS

Is examined the algorithm of the single-valued determination of objects coordinates from the results of phase shifts measurements at five metric frequencies of the radio-navigation system (RNS) "Krabik", intended for marine users navigation support. In this case single-valued coordinates realizes due to the use of a integer cycles search method of the phase ambiguity resolution and selection of a coordinates, which correspond to the maximum of a likelihood function. It is shown that the solution of the problem presented is achieved at the presence of redundancy in the system of equations, intended for determining the objects coordinates. The calculation the ambiguity resolution success rate, depending on a phase shifts root mean square error for "Krabik" RNS servicing zone is carried out.

Keywords: radio navigation, ambiguity resolution, probability.