

Антон Борисович Токарев родился в 1971 г., окончил в 1992 г. Воронежский государственный технический университет. Канд. техн. наук, доцент кафедры “Радиотехника” Воронежского государственного технического университета. Автор ряда работ в области цифровых алгоритмов обработки радио- и видеосигналов, а также методов цифрового спектрального анализа сигналов.

A.B. Tokarev (b. 1971) graduated from the Voronezh State Technical University in 1992. Ph. D. (Eng.), assoc. professor of “Radio Technology” department of the Voronezh State Technical University. Author of a number of publications in the field of digital algorithms of processing radio- and videosignals as well as methods of digital spectral analysis of signals.

УДК 621.396.98

И. Б. В л а с о в, С. Н. К а р у т и н

БЕСПЕРЕБОРНЫЙ МЕТОД РАСКРЫТИЯ НЕОДНОЗНАЧНОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ ФАЗЫ В УГЛОМЕРНОЙ НАВИГАЦИОННОЙ АППАРАТУРЕ СИСТЕМЫ GPS

Представлен алгоритм раскрытия неоднозначности измерений фазы в угломерной навигационной аппаратуре системы GPS с многошарнирной антенной системой, образованной коллинеарными неэквидистантными базами. Алгоритм позволяет отказаться от требования однозначного измерения разности хода сигналов на малой базе за счет привлечения измерений псевдодальности. Приведены результаты экспериментального исследования предложенного алгоритма.

Развернутые в 80-х годах XX века спутниковые радионавигационные системы (СРНС) второго поколения ГЛОНАСС (Россия) и GPS (США) создают когерентное радионавигационное поле, которое позволяет определять абсолютные координаты потребителя на основе измерения дальности от навигационных космических аппаратов (НКА), положение которых в пространстве известно, до потребителя. Для определения положения потребителя в трехмерной системе координат навигационная аппаратура должна одновременно произвести измерение дальности до трех НКА, но поскольку в СРНС отсутствует синхронизация между источниками сигналов и приемником, то к неизвестным добавляется расхождение шкал времени системы и потребителя и минимально необходимое количество измерений возрастает до четырех. В настоящее время потребители могут наблюдать одновременно до двенадцати НКА одной системы, что позволяет использовать при решении навигационных задач избыточные измерения псевдодальности и фазы [1–3].

За время, прошедшее с момента создания СРНС, было экспериментально доказано, что после определения абсолютных координат потребителя навигационная аппаратура, построенная по принципу радиоинтерферометрии, позволяет определять угловую ориентацию объекта [4, 5]. Достигнутая на настоящее время точность (среднее квадратическое отклонение — СКО) угловых определений с помощью угломерной навигационной аппаратуры имеет порядок нескольких угловых минут, что соответствует точности высококлассных гироскопических средств, традиционно применяемых для определения угловой ориентации, при этом стоимость угломерной навигационной аппаратуры оказывается в два-три раза ниже. Кроме того, она свободна от важнейшего недостатка гироскопических систем — эффекта деградации точности с увеличением времени измерений. Поэтому, несмотря на известные недостатки СРНС — неавтономность (зависимость от навигационного поля), а также несколько большее, чем в гироскопических системах, значение шумовой и некоторых других составляющих ошибок, — угломерная навигационная аппаратура является весьма перспективным видом спутниковой навигационной аппаратуры, что подтверждено опытом отечественных и зарубежных промышленных разработок.

НКА СРНС излучают сложные фазоманипулированные сигналы, которые позволяют навигационным приемникам формировать два типа измерений — псевдодалности и фазы. При этом ошибка измерения псевдодалности на три порядка превосходит ошибку измерений фазы [2], поэтому для решения задач определения угловой ориентации используют измерения фазы. Принципиальной особенностью любой фазовой интерферометрической системы является возможность однозначного измерения разности хода сигналов только в том случае, когда длина базовой линии не превосходит половину длины волны несущих колебаний (длина волны в СРНС составляет 18–19 см). Для обеспечения точности угловых определений в несколько угловых минут необходимо использовать базы длиной несколько метров, поэтому измерения фазы характеризуются неоднозначностью, описываемой в модели первичных измерений параметром фазовой неоднозначности.

Таким образом, одной из важнейших задач, с которой сталкиваются разработчики фазовых радиоинтерферометрических навигационных систем, является раскрытие неоднозначности измерения разности хода сигналов. В разработанных методах раскрытия неоднозначности измерений фазы в угломерной навигационной аппаратуре предполагается, что для определения ориентации любой оси объекта используется только одна база. Поэтому при разработке этих методов основное внимание уделялось переборным процедурам, реализующим

поиск максимально правдоподобного целочисленного значения неоднозначности. Вопросам теоретического и практического исследования переборных методов посвящены многочисленные работы отечественных и зарубежных ученых К.В. Пензина, А.А. Поваляева, А.А. Фатеева, Б.В. Ремонди, П. Теуниссена и др. [6–15]. Основным недостатком этих методов является необходимость наблюдения максимально возможного количества НКА (для раскрытия неоднозначности за время порядка одной минуты необходимо не менее семи НКА [11]), в то время как для решения задачи определения абсолютных координат потребителя достаточно измерений по четырем НКА. В том случае, когда для раскрытия неоднозначности привлекаются измерения, полученные в другие моменты времени, дополнительно необходимо решать задачи обеспечения непрерывности слежения за сигналом НКА, а также обнаружения и исправления ошибок, вызванных сбоями в работе схем фазовой автоподстройкой несущей частоты.

В то же время, в радиоастрономии для решения задачи раскрытия неоднозначности широко используются беспереборные методы, основанные на использовании многошкальных коллинеарных антенных систем. Большой вклад в разработку фундаментальных основ данных методов внесли Л.И. Матвеев, С.С. Моисеев, Б. Ловел, Б. Берк и др. [16]. Необходимо отметить, что используемые в радиоастрономии беспереборные методы строятся на предположении, что малая база позволяет производить однозначные измерения, т.е. ее длина не превышает половины длины волны несущих колебаний.

В радионавигации данное ограничение может быть снято, поскольку навигационная аппаратура помимо измерений фазы формирует однозначные измерения псевдодальности, которые используются для решения стандартных навигационных задач. Однако до настоящего времени алгоритмы, позволяющие реализовать это преимущество, исследованы недостаточно.

В настоящей работе представлен беспереборный алгоритм раскрытия неоднозначности в навигационной аппаратуре потребителя (НАП) с многобазовой коллинеарной неэквидистантной линейной антенной системой, основанный на привлечении измерений псевдодальности. Приведены результаты экспериментального исследования алгоритма раскрытия неоднозначности.

Модели отсчетов измерений псевдодальности и фазы. Фундаментальным понятием спутниковой навигации является псевдодальность, которая определяется как произведение скорости света на псевдозадержку. Под псевдозадержкой понимается разность между моментом излучения сигнала спутником по шкале времени НКА и моментом

приема сигнала по шкале времени приемника, измеренная с точностью до задержки сигнала на трассе распространения и ошибок измерения. Исходя из этого, формируемый приемником отсчет псевдодальности можно описать следующим выражением [2, 12]:

$$S = R + \Delta R + c(\Delta t - \Delta T + \Delta t_{\text{тр}} + \Delta t_{\text{ион}} + \Delta t_{\text{пр}}) + \mu + \varepsilon, \quad (1)$$

где $R = \sqrt{(X_{\text{НКА}} - X_{\text{п}})^2 + (Y_{\text{НКА}} - Y_{\text{п}})^2 + (Z_{\text{НКА}} - Z_{\text{п}})^2}$ — дальность от НКА до приемника; $X_{\text{НКА}}, Z_{\text{НКА}}, Y_{\text{НКА}}$ — координаты НКА на момент излучения; $X_{\text{п}}, Z_{\text{п}}, Y_{\text{п}}$ — координаты приемника на момент приема сигнала; ΔR — ошибка эфемеридного обеспечения; Δt — расхождение шкалы времени НКА с системной шкалой времени; ΔT — расхождение шкалы времени приемника с системной шкалой времени; $\Delta t_{\text{тр}}$ — задержка сигнала в тропосфере; $\Delta t_{\text{ион}}$ — задержка сигнала в ионосфере; $\Delta t_{\text{пр}}$ — аппаратная задержка сигнала в приемнике; μ — ошибка измерения псевдодальности, обусловленная приемом переотраженных сигналов (многолучевостью); ε — аппаратная ошибка измерения псевдодальности.

Отсчет полной фазы колебаний псевдодоплеровской частоты (в дальнейшем для краткости — просто отсчет фазы) описывается выражением

$$\psi = \frac{R + \Delta R}{\lambda} + f(\Delta t - \Delta T + \Delta t_{\text{тр}} - \Delta t_{\text{ион}} + \Delta t_{\text{пр}}) + N + \varphi_0 - \psi_0 + \eta + \delta; \quad (2)$$

здесь λ — длина волны колебаний, излучаемых НКА; f — несущая частота колебаний, излучаемых НКА; N — неизвестное количество периодов несущих колебаний, или параметр фазовой неоднозначности (ПФН); φ_0 — неопределенная начальная фаза сигнала НКА; ψ_0 — неопределенная начальная фаза приемника, одинаковая для всех НКА; η — ошибка измерения фазы, обусловленная многолучевостью; δ — аппаратная ошибка измерения фазы.

Метод раскрытия неоднозначности в многошкальном интерферометре. Рассмотрим принципы раскрытия неоднозначности на примере интерферометра с двумя коллинеарными базами (рис. 1). Антенны A_0, A_1 и A_2 принимают сигнал от НКА. Информация об ориентации базовых линий заложена в разностях хода сигналов Δr_1 и Δr_2 . Линии в направлении на НКА можно считать параллельными, поскольку расстояние до НКА (порядка 20 тыс. км) существенно превосходит длины базовых линий (несколько метров). Следовательно, на основании свойства подобия разности хода сигналов связаны с длинами базовых линий следующим соотношением:

$$\frac{d_2}{d_1} = \frac{\Delta r_2}{\Delta r_1}. \quad (3)$$

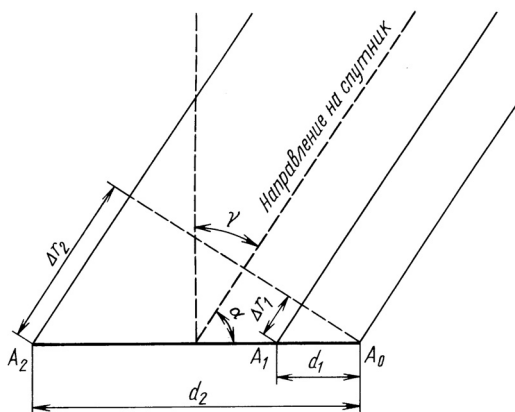


Рис. 1. Двухшкальный интерферометр

При наличии априорной информации о длинах базовых линий, используя для оценки разности хода Δr_2 однозначные измерения псевдодальности, можно получить значение Δr_1 и раскрыть неоднозначности измерений фазы на базе A_0A_1 .

Разность хода сигналов на базе A_0A_2 может быть оценена с помощью измерений псевдодальности и фазы путем вычитания измерений, сформированных приемником A_0 , из измерений, сформированных приемником A_2 . Полученные выражения носят название первых разностей и с использованием моделей отсчетов первичных измерений (1) и (2) могут быть записаны в следующем виде:

$$\Delta S_{A_0A_2} = \Delta R_{A_0A_2} + c(\Delta t_{A_0A_2} + \Delta t_{\text{пр}A_0A_2}) + \mu_{A_0A_2} + \varepsilon_{A_0A_2}, \quad (4)$$

$$\Delta \psi_{A_0A_2} = \frac{\Delta R_{A_0A_2}}{\lambda} + f(\Delta t_{A_0A_2} + \Delta t_{\text{пр}A_0A_2}) + N_{A_0A_2} + \eta_{A_0A_2} + \delta_{A_0A_2}, \quad (5)$$

где $\Delta R_{A_0A_2} = R_{A_2} - R_{A_0}$ — разность дальностей от НКА до приемников A_2 и A_0 ; $\Delta t_{A_0A_2} = \Delta t_{A_2} - \Delta t_{A_0}$ — разность расхождений шкал времени приемников A_2 и A_0 относительно системной шкалы времени; $\Delta t_{\text{пр}A_0A_2} = \Delta t_{\text{пр}A_2} - \Delta t_{\text{пр}A_0}$ — разность задержек сигналов в трактах приемных устройств; $N_{A_0A_2} = N_{A_2} - N_{A_0}$ — разность ПФН; $\Delta \psi_{A_0A_2} = \psi_{A_2} - \psi_{A_0}$ — разность неопределенных значений начальных фаз приемников, общая для всех НКА; $\mu_{A_0A_2}$ — суммарная составляющая ошибки измерения разности псевдодальности, обусловленная многолучевостью; $\eta_{A_0A_2}$ — суммарная составляющая ошибки измерения разности фаз, обусловленная многолучевостью; $\varepsilon_{A_0A_2}$ — суммарная шумовая и динамическая составляющая ошибки измерения разности псевдодальностей; $\delta_{A_0A_2}$ — суммарная шумовая и динамическая составляющая ошибки измерения разности фаз.

Разность хода сигналов на базе A_0A_1 , как и на базе A_0A_2 , может быть оценена с помощью первой разности измерений фазы (см. выражение (5)):

$$\Delta\psi_{A_0A_1} = \frac{\Delta R_{A_0A_1}}{\lambda} + f(\Delta t_{A_0A_1} + \Delta t_{\text{пр}A_0A_1}) + N_{A_0A_1} + \eta_{A_0A_1} + \delta_{A_0A_1}. \quad (6)$$

Поскольку величины $\Delta R_{A_0A_2}$ и $\Delta R_{A_0A_1}$ равны соответственно Δr_1 и Δr_2 , то на основании выражений (3), (4) и (6) можно получить следующее соотношение, связывающее измерения псевдодальности и измерения фазы на базе A_0A_2 :

$$\begin{aligned} &\Delta\psi_{A_0A_1} - f(\Delta t_{A_0A_1} + \Delta t_{\text{пр}A_0A_1}) - N_{A_0A_1} - \eta_{A_0A_1} - \delta_{A_0A_1} = \\ &= \frac{1}{\lambda} \left(\frac{d_1}{d_2} (\Delta S_{A_0A_2} - c(\Delta t_{A_0A_2} + \Delta t_{\text{пр}A_0A_2}) - \mu_{A_0A_2} - \varepsilon_{A_0A_2}) \right). \quad (7) \end{aligned}$$

Исключить из выражения (7) составляющие $\Delta t_{A_0A_2} + \Delta t_{\text{пр}A_0A_2}$ и $\Delta t_{A_0A_1} + \Delta t_{\text{пр}A_0A_1}$ можно путем вычитания первой разности измерений, сформированных по НКА l , из измерений, сформированных по НКА m . Полученная разность носит название второй разности измерений фазы $\Delta_2\psi_{A_0A_1}^{ml}$ и псевдодальности $\Delta_2S_{A_0A_2}^{ml}$. Выражение, связывающее измерения фазы и псевдодальности, можно представить в виде

$$\begin{aligned} &\Delta_2\psi_{A_0A_1}^{ml} - N_{A_0A_1}^{ml} - \eta_{A_0A_1}^{ml} - \delta_{A_0A_1}^{ml} = \\ &= \frac{1}{\lambda} \left(\frac{d_1}{d_2} (\Delta_2S_{A_0A_2}^{ml} - \mu_{A_0A_2}^{ml} - \varepsilon_{A_0A_2}^{ml}) \right), \quad (8) \end{aligned}$$

где $\Delta_2S_{A_0A_2}^{ml} = \Delta S_{A_0A_2}^m - \Delta S_{A_0A_2}^l$ — вторая разность измерений псевдодальности для НКА m и НКА l и приемников A_0 и A_2 ; $N_{A_0A_1}^{ml} = N_{A_0A_1}^m - N_{A_0A_1}^l$ — вторая разность ПФН; $\mu_{A_0A_2}^{ml}$ — суммарная составляющая ошибки измерений псевдодальности, обусловленная многолучевостью; $\varepsilon_{A_0A_2}^{ml}$ — суммарная составляющая аппаратной ошибки измерений псевдодальности; $\eta_{A_0A_1}^{ml}$ — суммарная составляющая ошибки измерений фазы, обусловленная многолучевостью; $\delta_{A_0A_1}^{ml}$ — суммарная составляющая аппаратной ошибки измерений фазы.

Получим вторую разность $N_{A_0A_1}^{ml}$ из выражения (8):

$$N_{A_0A_1}^{ml} = \Delta_2\psi_{A_0A_1}^{ml} - \eta_{A_0A_1}^{ml} - \delta_{A_0A_1}^{ml} - \frac{1}{\lambda} \left(\frac{d_1}{d_2} (\Delta_2S_{A_0A_2}^{ml} - \mu_{A_0A_2}^{ml} - \varepsilon_{A_0A_2}^{ml}) \right). \quad (9)$$

Пренебрегая ошибками измерения $\mu_{A_0A_2}^{ml}$, $\eta_{A_0A_1}^{ml}$, $\varepsilon_{A_0A_2}^{ml}$ и $\delta_{A_0A_1}^{ml}$, можно получить оценку второй разности ПФН с помощью следующего выражения:

$$N_{A_0A_1}^{ml} = \text{int} \left\{ \Delta_2 \psi_{A_0A_1}^{ml} - \frac{1}{\lambda} \frac{d_1}{d_2} \Delta_2 S_{A_0A_2}^{ml} \right\}, \quad (10)$$

где $\text{int}\{\cdot\}$ — операция округления до ближайшего целого.

Раскрыв неоднозначность на базе A_0A_1 , используя однозначные измерения фазы на малой базе и выполнив преобразования, аналогичные преобразованиям (7)–(10), можно получить следующее выражение для оценки второй разности ПФН на базе A_0A_2 :

$$N_{A_0A_2}^{ml} = \text{int} \left\{ \Delta_2 \psi_{A_0A_2}^{ml} - \frac{d_1}{d_2} (\Delta_2 \psi_{A_0A_1}^{ml} - N_{A_0A_1}^{ml}) \right\}. \quad (11)$$

Поскольку неоднозначность измерений фазы раскрывается независимо для каждой пары НКА, то для определения угловой ориентации можно использовать минимальное количество спутников, равное четырем, т.е. использовать измерения по тем же НКА, что и при решении стандартных навигационных задач.

Определение соотношения длин и количества базовых линий. Очевидно, что выражение (10) справедливо только в случае, если ошибка измерения не превышает длину интервала однозначного измерения разности хода сигналов. В случае измерений фазы длина этого интервала равна половине длины волны несущих колебаний. Следовательно, отношение длин базовых линий необходимо выбирать таким, чтобы в результате пропорционального уменьшения ошибка измерения разности хода сигналов не превышала половину длины волны:

$$\eta_{A_0A_1}^{ml} + \delta_{A_0A_1}^{ml} + \frac{1}{\lambda} \frac{d_1}{d_2} (\mu_{A_0A_2}^{ml} + \varepsilon_{A_0A_2}^{ml}) < \frac{1}{2}. \quad (12)$$

Полагая закон распределения измеряемых параметров гауссовским, можно преобразовать условие (12) в следующее условие:

$$p_\alpha \sqrt{\left(\frac{d_1}{d_2} \sigma_S\right)^2 + \sigma_\psi^2} < \frac{\lambda}{2}, \quad (13)$$

где p_α — α -квантиль нормального закона распределения; σ_S — СКО второй разности измерений псевдодальности; σ_ψ — СКО второй разности измерений фазы (в масштабе длин волн, мм).

Из выражения (13) можно определить нижнюю границу диапазона возможных значений отношения длин баз d_2/d_1 при заданной вероятности α ошибки определения ПФН:

$$\frac{d_2}{d_1} > \sqrt{\frac{(p_\alpha \sigma_S)^2}{\lambda^2 - (p_\alpha \sigma_\psi)^2}}. \quad (14)$$

Оценка ПФН с помощью выражения (11) справедлива, если ошибка оценки величины разности хода сигналов на базе A_0A_1 не превысит половину длины волны:

$$\frac{d_2}{d_1}(\eta_{A_0A_1}^{ml} + \delta_{A_0A_1}^{ml}) + \eta_{A_0A_2}^{ml} + \delta_{A_0A_2}^{ml} < \frac{1}{2}. \quad (15)$$

Аналогично условию (12), условие (15) может быть преобразовано в следующее:

$$p_\alpha \sqrt{\left(\frac{d_2}{d_1} \sigma_\psi\right)^2 + \sigma_\psi^2} < \frac{\lambda}{2}. \quad (16)$$

Выражение (16) позволяет определить верхнюю границу диапазона возможных значений отношения длин базовых линий:

$$\frac{d_2}{d_1} < \sqrt{\frac{\frac{\lambda^2}{4} - (p_\alpha \sigma_\psi)^2}{(p_\alpha \sigma_\psi)^2}}. \quad (17)$$

Как показано в работах [1–3], шумовая составляющая (СКО) ошибки измерения псевдодальности равна примерно 3,5 м, а фазы — около $1,5^\circ$ (5 мм). Для данной точности измерения навигационных параметров совместное выполнение условий (12) и (13) возможно лишь с вероятностью 70 % при отношении длин базовых линий ~ 40 .

Повысить вероятность правильного раскрытия неоднозначности можно путем введения дополнительных коллинеарных баз, позволяющих реализовать поэтапный переход с короткой базы на длинную. При этом для раскрытия неоднозначности на малой базе необходимо использовать выражение (10), а для поэтапного перехода на большую базу — выражение (11).

Оценка количества V базовых линий непосредственно следует из неравенств (14) и (17):

$$\sqrt{\frac{(p_\alpha \sigma_S)^2}{\frac{\lambda^2}{4} - (p_\alpha \sigma_\psi)^2}} < \left(\sqrt{\frac{\frac{\lambda^2}{4} - (p_\alpha \sigma_\psi)^2}{(p_\alpha \sigma_\psi)^2}} \right)^V, \quad (18)$$

откуда

$$V \geq \frac{\lg \left(\sqrt{\frac{(p_\alpha \sigma_S)^2}{\frac{\lambda^2}{4} - (p_\alpha \sigma_\psi)^2}} \right)}{\lg \left(\sqrt{\frac{\frac{\lambda^2}{4} - (p_\alpha \sigma_\psi)^2}{(p_\alpha \sigma_\psi)^2}} \right)}. \quad (19)$$

Уменьшить отношение длин базовых линий можно за счет повышения точности измерения псевдодальности. Эффективным способом уменьшения шумовой составляющей ошибки измерения псевдодальности является сглаживание, основанное на использовании приращений измерений фазы [12]. При интервале между отсчетами, равном интервалу корреляции флюктуационной составляющей погрешности единичных отсчетов или превышающем его, дисперсия оценки значения псевдодальности уменьшается пропорционально количеству отсчетов, используемых для сглаживания. Выражение для получения оценки значения псевдодальности на момент времени t_q с помощью M последовательных единичных отсчетов имеет вид [12]

$$\hat{S}_M^\psi(t_q) = \frac{1}{M} \left(\sum_{i=1}^M S_i(t_{q-M+i}) + \Delta S^\psi(t_{q-M+i}, t_q) \right), \quad (20)$$

где $\Delta S^\psi(t_{q-M+i}, t_q) = \lambda(\psi(t_q) - \psi(t_{q-M+i}))$ — приращение дальности, определенное с помощью измерений фазы.

Экспериментальное исследование. Экспериментальное исследование эффективности предлагаемого метода раскрытия неоднозначности проводилось с использованием опытного образца угломерной НАП, состоящего из трех двенадцатиканальных параллельных навигационных приемников систем ГЛОНАСС/GPS и управляющей ЭВМ. В ходе эксперимента антенная система НАП была развернута на крыше шестиэтажного здания и жестко закреплена. Работа комплекса при использовании сигналов НКА системы GPS исследовалась на двух комплексах антенн разного типа. Оба типа антенн относятся к классу геодезических антенн. Однако применение в конструкции антенн первого типа семейства концентрических колец, являющихся четвертьволновыми трансформаторами, позволяет уменьшить ошибку измерений навигационных параметров, обусловленную многолучевостью, что делает данный тип антенн широко применяемым в тех случаях, когда стремятся максимально уменьшить аппаратную ошибку измерения.

Второй тип является наиболее распространенным видом геодезических антенн, поскольку отказ от использования колец позволяет сократить их габаритные размеры и стоимость при некотором ухудшении точности измерения навигационных параметров. Первый тип антенн представлен антеннами Ashtech Choke Ring, второй тип — антеннами Javad MarAnt [17, 18].

Эксперимент включал четыре этапа, каждый продолжительностью 12 часов. В ходе первых двух этапов эксперимента проводилась оценка СКО измерения псевдодалности и фазы в зависимости от угла места НКА при различном количестве отсчетов, привлекаемых для сглаживания. Поскольку в алгоритме используются вторые разности, при формировании которых необходимы измерения по двум НКА, то в каждый момент времени из рабочего созвездия навигационных спутников выбирался один (базовый) НКА, с которым все остальные образовывали требуемые разности измерений. В качестве базового НКА выбирался спутник с наибольшим углом места. Это связано с тем, что измерения по такому НКА характеризуются наибольшей точностью измерения из-за высокого отношения сигнал/шум и малой величины искажений, вносимых многолучевостью. В ходе данного эксперимента угол места базового НКА находился в диапазоне $52 \dots 90^\circ$. Поэтому на представленных далее графиках параметр “угол места” характеризует положение второго НКА. На рис. 2 приведены зависимости СКО второй разности измерений псевдодалности от угла места НКА. Резкое возрастание СКО при углах места менее 10° не позволяет рассчитывать на высокую вероятность правильного раскрытия неоднозначности, по-

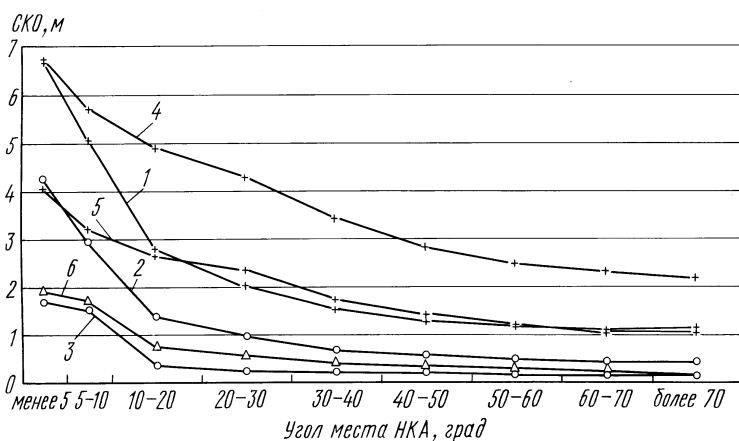


Рис. 2. Зависимость СКО второй разности измерений псевдодалности от угла места НКА для антенн различного типа (1–3 — Ashtech Choke Ring, 4–6 — Javad MarAnt) и различного количества отсчетов, используемых при сглаживании: 1, 4 — один отсчет; 2, 5 — 10 отсчетов; 3, 6 — 500 отсчетов

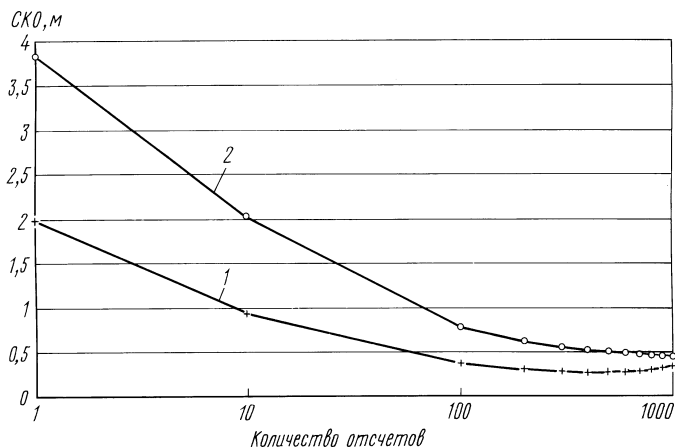


Рис. 3. Зависимость СКО второй разности измерений псевдодалности от количества отсчетов, используемых при сглаживании, для антенн различного типа: 1 — Ashtech Choke Ring; 2 — Javad MarAnt

этому измерения по НКА, находящимся в данном диапазоне углов, при дальнейшей обработке не используются. Зависимость СКО второй разности измерений псевдодалности от количества отсчетов для НКА с углами места более 10° представлена на рис. 3. Зависимость СКО второй разности измерений фазы от угла места НКА приведена на рис. 4.

Из рис. 3 видно, что привлечение более чем 500 отсчетов не приводит к значительному повышению точности оценки. Используя полученные значения СКО измерения псевдодалности и фазы (для НКА с углами места более 10°) и задав вероятности правильного раскрытия неоднозначности для обоих типов антенн, можно определить пара-

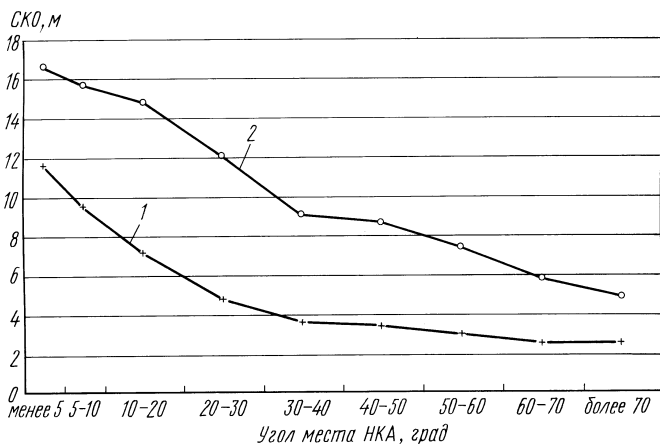


Рис. 4. Зависимость СКО второй разности измерений фазы псевдодоплеровской частоты от угла места НКА для антенн различного типа: 1 — Ashtech Choke Ring; 2 — Javad MarAnt

метры антенных систем, представленные в таблице.

Тип антенн	σ_S , м	σ_ψ , мм	α	V	d_1 , м	d_2 , м
Ashtech Choke Ring	0,26	4,98	0,97	2	0,38	3,01
Javad MarAnt	0,5	11,23	0,8	2	0,34	2,99

На заключительных этапах эксперимента проводилась оценка вероятности правильного раскрытия неоднозначности при использовании антенн обоих типов. Взаимное положение антенн определяется параметрами, приведенными в таблице. На рис. 5 приведены зависимости

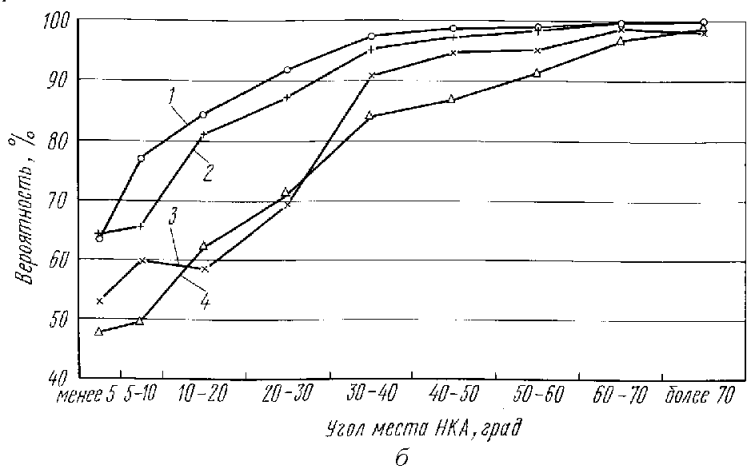
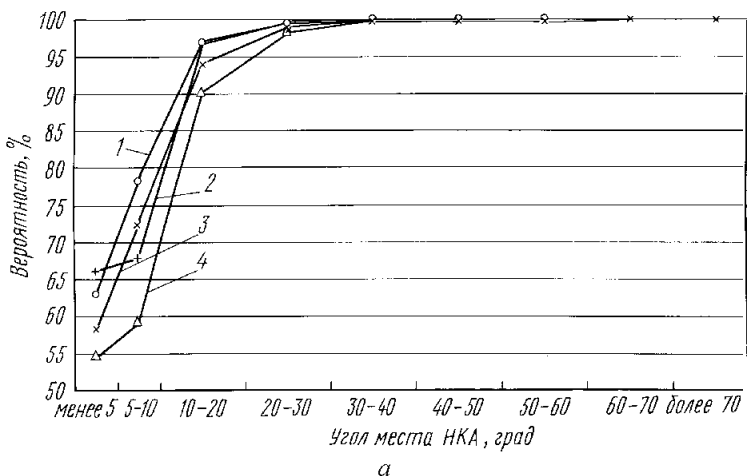


Рис. 5. Зависимость вероятности правильного раскрытия неоднозначности от угла места НКА для антенн Ashtech Choke Ring (а) и Javad MarAnt (б): 1, 2 — оценка неоднозначности с использованием измерений псевдодалности; 3, 4 — совместная оценка неоднозначности с использованием измерений псевдодалности и фазы (1, 3 — экспериментальные данные; 2, 4 — теоретические данные)

вероятности правильного раскрытия неоднозначности измерений фазы на базе d_1 с помощью измерений псевдодалности и на базе d_2 с помощью однозначных измерений фазы в зависимости от угла места НКА для обоих типов антенн.

Выводы. Полученные экспериментальные результаты подтверждают правильность выполненных теоретических расчетов и эффективность разработанного метода раскрытия неоднозначности. Для того чтобы сократить количество антенн и уменьшить габаритные размеры антенной системы интерферометра, целесообразно использовать процедуру сглаживания измерений псевдодалности с помощью приращенных измерений фазы. Предложенный алгоритм позволяет раскрывать неоднозначность измерений фазы в реальном масштабе времени с вероятностью не менее 95 % в двухшкальном интерферометре с длиной большой базы порядка 3 м.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. С е т е в ы е спутниковые радионавигационные системы / В.С. Шебшаевич, П.П. Дмитриев, Н.В. Иванцевич и др. – М.: Радио и связь, 1993. – 408 с.
2. K a p l a n E. D. Understanding GPS. Principles and Applications. – London: Artech House, 1996. – 555 p.
3. Г л о б а л ь н а я спутниковая радионавигационная система ГЛОНАСС / В.Н. Харисов, А.И. Перов, В.А. Болдин и др. – М.: ИПРЖР, 1999. – 560 с.
4. В л а с о в И. Б., П у д л о в с к и й В. Б., Т а р а х н о в С. Н. Точностные характеристики спутниковой навигационной аппаратуры с угломерным каналом // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. “Приборостроение”. – 1997. – № 1. – С. 114–127.
5. В л а с о в И. Б. Спутниковая радионавигационная аппаратура с угломерным каналом и перспективы ее применения // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. “Приборостроение”. – 1997. – № 4. – С. 16–22.
6. S h a o w e i H a n. Carrier phase-based long-range GPS kinematic positioning // UNISURV S-49. – 1997. – 185 с.
7. D i n g s h e n g C h e n. Fast Ambiguity Search Filter (FASF): A Novel Concept for GPS Ambiguity Resolution // Proc. of Conf. “ION GPS-92” (Albuquerque, New-Mexico (USA), 16–18 Sept. 1992). – P. 781–787.
8. M a s a b i a u C. A new concept for GPS Phase Ambiguity Resolution On-The-Fly: The Maximum a Posteriori Ambiguity Search (MAPAS) Method // Proc. of Conf. “ION GPS-95” (Palm Springs, California (USA), 12–15 Sept. 1995). – P. 299–308.
9. T e u n i s s e n P. J. G., D e J o u n g e P. J., T i b e r i u s C. Performance of the LAMBDA Method for Fast GPS Ambiguity Resolution // Navigation. – V. 4. – № 3. – P. 373–383.
10. D e J o u n g e P. J., T i b e r i u s C. The LAMBDA method for integer ambiguity estimation: implementation aspects. – Delft: Geodetic Computing Centre, 1996. – 50 p.
11. T i b e r i u s C., D e J o u n g e P. J. Fast positioning using the LAMBDA-method // 4th International Symposium on Differential Satellite Navigation Systems. – Bergen, Norway: 1995. – P. 30–38.

12. Л и п к и н И. А. Спутниковые навигационные системы. – М.: Вузовская книга, 2001. – 288 с.
13. П е н з и н К. В. Алгоритм оперативной обработки многошкальных измерений по критерию максимального правдоподобия // Радиотехника и электроника. – 1990. – Т. 35. – № 1. – С. 97–106.
14. А р м и з о н о в А. Н., Д е н и с о в В. П., Д у б и н и н Д. В. Методы приближенного расчета вероятностей правильного устранения неоднозначности в фазовых пеленгаторах с плоской антенной решеткой // Радиотехника и электроника. – 1995. – Т. 40. – № 2. – С. 249–254.
15. Д е н и с о в В. П. Анализ квазиоптимального алгоритма устранения неоднозначности в многошкальной фазовой измерительной системе // Радиотехника и электроника. – 1995. – Т. 40. – № 4. – С. 591–597.
16. И н с т и т у т космических исследований РАН — 35 лет. – М.: ИКИ РАН, 1999. – 208 с.
17. http://products.thalesnavigation.com/images/img_antenna5.gif
18. <http://www.javad.com/jns/products/marant.html>

Статья поступила в редакцию 27.11.2003

Игорь Борисович Власов родился в 1941 г., окончил в 1964 г. МВТУ им. Н.Э. Баумана. Д-р техн. наук, профессор кафедры “Радиоэлектронные системы и устройства” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 120 научных работ в области радиолокации и радионавигации.

I.B. Vlasov (b. 1941) graduated from the Bauman Moscow Higher Technical School in 1964. D. Sc. (Eng.), professor of “Radio Electronic Systems and Devices” department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 120 publications in the field of radiolocation and radionavigation.



Сергей Николаевич Карутин родился в 1975 г., окончил в 1999 г. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Аспирант кафедры “Радиоэлектронные системы и устройства” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Специализируется в области исследования алгоритмов определения пространственной ориентации объектов по сигналам спутниковых радионавигационных систем.

S.N. Karutin (b. 1975) graduated from the Bauman Moscow State Technical University in 1999. Post-graduate of “Radio Electronic Systems and Devices” department of the Bauman Moscow State Technical University. Specializes in the field of study of algorithms of spatial objects orientation by signals of global positioning systems.

