

В. С. БАХОЛДИН

## РАЗРЕШЕНИЕ НЕОДНОЗНАЧНОСТИ ФАЗОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ И ВЫБОР НЕСУЩИХ ЧАСТОТ В СПУТНИКОВОЙ НАВИГАЦИОННОЙ СИСТЕМЕ

Рассмотрены алгоритмы быстрого разрешения неоднозначности фазовых измерений. Предложен подход к выбору несущих частот в спутниковой навигационной системе ГЛОНАСС.

**Ключевые слова:** разрешение неоднозначности, фазовые измерения, космическая навигационная система, несущие частоты.

При разработке космической навигационной системы ГЛОНАСС с частотным разделением для определения ориентации объектов и высокоточных геодезических измерений не предполагалось использование фазовых измерений (ФИ). Поэтому применение таких известных методов, как пересчет измерений, метод синтезированных длин волн (СДВ) и метод совпадения дробных частей не позволяет решить проблему разрешения неоднозначности (РН) фазовых измерений на несущих частотах (НЧ) в реальном масштабе времени по выборке одномоментных измерений дробной части фазового цикла (ФЦ).

Решение этой проблемы было получено с помощью математической теории чисел и метода некрatных шкал (НШ). Под методом некрatных шкал понимается положение, при котором в более грубой измерительной шкале не „укладывается“ целое число точных шкал, как, например, в методе пересчета измерений, и отношение их длин (периодов) представляет собой простую дробь [1]. Для обеспечения согласованности двух некрatных измерительных шкал (безошибочного разрешения неоднозначности) необходимо выполнить условие, которое для случая распределения погрешностей измерения дробных частей фазового цикла по нормальному закону в интервале  $|\delta\varphi| < Z\sigma_\varphi$  (где  $Z\sigma_\varphi$  — предельная ошибка) принимает следующий вид:

$$\delta r_i = \text{int} \left( \sqrt{(P_i^2 + \Theta_i^2) \delta\varphi^2 + (P_i \Theta_i \delta\alpha_i)^2} + 0,5 \right), \quad (1)$$

где  $\delta r_i$  — ошибка РН;  $\alpha_i = \frac{f_1}{f_i} \approx \frac{P_i}{\Theta_i} + \delta\alpha_i$ ,  $\delta\alpha_i = \left| \alpha_i - \frac{P_i}{\Theta_i} \right|$ , а  $\frac{P_i}{\Theta_i}$  — дробь, аппроксимирующая

отношение частот  $\alpha_i$  с погрешностью  $\delta\alpha_i < \frac{1}{\Theta_i^2}$ .

Диапазон разрешения неоднозначности в фазовой измерительной системе определяется как  $D_n = \text{НОК}(P_1, P_2, \dots, P_n)$ . Для несущих частот  $f_1=1602$  МГц и  $f_2=1246$  МГц системы ГЛОНАСС в качестве аппроксимирующей дроби с погрешностью  $\delta\alpha_1 = 0$  можно использовать

отношение  $\frac{P_1}{\Theta_1} = \frac{9}{7}$ , которое сохраняется для всех НЧ. Это позволяет использовать идентичные

коэффициенты в алгоритме РН для любого навигационного космического аппарата (НКА).

Обозначим через  $R_k$  дальность (между потребителем и космическим аппаратом), измеренную с использованием дальномерного кода;  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$  — измеренные значения дробной части ФЦ;  $r_1$  — число длин волн  $\lambda_1$ , полученное в результате РН. Тогда дальность  $R_{f_1}$  на НЧ  $f_1$  вычисляется по следующим формулам:

$$r_1 = 4 \operatorname{int} \left( \frac{9\varphi_2}{2\pi} - \frac{7\varphi_1}{2\pi} + 0,5 \right) \bmod 9, \quad R_{f_1} = \lambda_1 \left[ \left( r_1 + \frac{\varphi_1}{2\pi} \right) + 9 \operatorname{int} \left( \frac{\operatorname{int} \left( \frac{R_k}{\lambda_1} + 0,5 \right) - r_1}{9} + 0,5 \right) \right].$$

Согласованность некрatных шкал обеспечивается при предельной погрешности фазовых измерений, равной 0,02 ФЦ, так как

$$\delta r_1 = \operatorname{int} \left( \sqrt{(P_1^2 + \Theta_1^2) \delta \varphi_1^2 + (P_1 \Theta_1 \delta \alpha_1)^2} + 0,5 \right) = \operatorname{int} \left( \sqrt{130 \cdot 0,02^2} + 0,5 \right) = 0.$$

Синтезированная длина волны для метода некрatных шкал  $\Lambda_{\text{НШ}} = P_1 \lambda_2 \approx 0,86$  м, что обеспечивает согласованность двух НШ с дальномерным кодом высокой точности. Рассмотренный способ разрешения неоднозначности фазовых измерений на двух несущих частотах защищен патентом [2].

Для увеличения диапазона РН возможно использование третьей частоты  $f_3 = 1201,5$  МГц, которую ранее планировалось ввести в ГЛОНАСС с частотным разделением сигналов НКА.

В этом случае отношения несущих частот составляют  $\alpha_1 = \frac{f_1}{f_2} = \frac{\lambda_2}{\lambda_1} = \frac{P_1}{\Theta_1} = \frac{9}{7}$  и

$\alpha_2 = \frac{f_1}{f_3} = \frac{\lambda_3}{\lambda_1} = \frac{P_2}{\Theta_2} = \frac{4}{3}$ , а диапазон РН —  $D = \text{НОК}(P_1 P_2) = 36$  или 674,49 см. Для частот

$f_2$  и  $f_3$  может быть получен такой же диапазон РН, но при более высоких требованиях к погрешностям фазовых измерений. Трехчастотный способ РН ФИ, использующий некрatные шкалы, был запатентован для системы GPS [3].

Рассмотрим связь между диапазонами РН для метода некрatных шкал и метода СДВ.

Синтезированная длина волны для двух НЧ определяется как  $\Lambda_{\text{СДВ}} = \frac{c}{f_2 - f_1} = \lambda_1 \frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1}$ . Для

метода некрatных шкал отношение двух НЧ  $\alpha = \frac{f_1}{f_2} = \frac{\lambda_2}{\lambda_1} = \frac{P}{\Theta}$  обеспечивает РН в диапазоне

$\Lambda_{\text{НШ}} = P \lambda_1 = \Theta \lambda_2$ . Подставив значение  $\lambda_2$ , выраженное через  $\lambda_1$ , в формулу для синтезированной длины волны, получим

$$\Lambda_{\text{СДВ}} = \lambda_1 \frac{\lambda_1 \frac{P}{\Theta}}{\lambda_1 \frac{P}{\Theta} - \lambda_1} = \frac{\lambda_1^2 \frac{P}{\Theta}}{\lambda_1 \left( \frac{P}{\Theta} - 1 \right)} = \frac{\lambda_1 \frac{P}{\Theta}}{\left( \frac{P - \Theta}{\Theta} \right)} = \frac{P \lambda_1}{P - \Theta}.$$

Как следует из данного соотношения, диапазон РН для метода СДВ равен диапазону РН для метода некрatных шкалах, если числитель и знаменатель правильной дроби, которой аппроксимируется отношение измерительных шкал, отличаются на единицу. Во всех остальных случаях диапазон РН при использовании метода некрatных шкал будет больше. Работоспособность рассмотренных алгоритмов была подтверждена математическим моделированием с использованием метода Монте-Карло.

При выборе параметров сигнала модернизируемой системы ГЛОНАСС разработчиками учитывались следующие основные ограничительные факторы:

— новые сигналы должны оставаться в полосе частот, отведенной в настоящее время для ГЛОНАСС, вследствие длительности и сложности процедур согласования заявки на новый частотный диапазон на международном уровне;

— мощность спектральных составляющих вновь вводимых сигналов не должна превышать установленные пороги в радиоастрономическом диапазоне;

— объединение сигналов диапазонов  $L_2/L_3$  для излучения через общую антенну представляет собой труднореализуемую задачу;

— несущие и тактовые частоты сигналов с кодовым разделением должны быть кратны частоте  $f_b=1,023$  МГц, принятой за базовую.

В результате проведенных исследований были предложены следующие частоты излучения сигнала ГЛОНАСС с кодовым разделением: в диапазоне  $L_1$  — на несущей частоте  $f_1=1565f_b=1600,995$  МГц; в диапазоне  $L_2$  — на несущей частоте  $f_2=1220f_b=1248,06$  МГц и в диапазоне  $L_3$  — на несущей частоте  $f_3=1175f_b=1202,025$  МГц [4]. Однако синтезированная длина волны плохо согласуется с указанными НЧ, так как в ней не „укладывается“ целое число длин волн ни одной из данных частот.

Для метода некрatных шкал соотношения выбранных НЧ представляются как  $\alpha_1 = \frac{f_2}{f_1} = \frac{244}{313}$  и  $\alpha_2 = \frac{f_3}{f_1} = \frac{235}{313}$ . Условие согласованности шкал  $\delta r_i = 0$  для указанных отношений частот может быть выполнено, если  $|\delta\phi| < 0,0013$ . Так как в требованиях к наземному комплексу ГЛОНАСС точность фазовых измерений задана на уровне 0,9 мм, согласованность шкал не обеспечивается, и применение метода некрatных шкалах не представляется возможным.

Для обеспечения быстрого РН ФИ в системе ГЛОНАСС предлагается излучать сигналы на несущих частотах

$$f_1=1602,018 \text{ МГц}, f_2=1246,014 \text{ МГц}, f_3=1203,048 \text{ МГц} \quad (2)$$

при тактовой частоте кода 1,023 МГц. Введение данных частот позволит для разрешения неоднозначности фазовых измерений использовать как метод некрatных шкал, так и метод СДВ.

Синтезированная длина волны при таком выборе частот оказывается кратной НЧ  $f_2, f_3$  и обеспечивает решение задачи оперативного разрешения неоднозначности:

$$\Lambda_{\text{СДВ}} = \frac{c}{f_2 - f_3} = \frac{299\,792\,458}{1246\,014\,000 - 1203\,048\,000} = 6,977 \text{ м} = 29\lambda_2 = 28\lambda_3.$$

Для метода некрatных шкал предложенные НЧ образуют отношения

$$\alpha_1 = \frac{f_1}{f_2} = \frac{\lambda_2}{\lambda_1} = \frac{P_1}{\Theta_1} = \frac{9}{7}, \quad \alpha_2 = \frac{f_3}{f_2} = \frac{\lambda_2}{\lambda_3} = \frac{P_2}{\Theta_2} = \frac{28}{29}, \quad \alpha_3 = \frac{f_1}{f_3} = \frac{\lambda_3}{\lambda_1} = \frac{P_3}{\Theta_3} = \frac{261}{196}.$$

Отсюда следует, что для частот  $f_2$  и  $f_3$  диапазон РН равен диапазону для метода СДВ, а максимально возможный диапазон РН для метода некрatных шкалах составит  $\Lambda_{\text{НШ}} = P_3\lambda_1 = \Theta_3\lambda_2 = 48,842$  м. Так как значения числителя и знаменателя отношения  $\alpha_3$  велики, то для снижения требования к точности измерения дробной части фазового цикла процедуру разрешения неоднозначности следует выполнять не на двух, а на трех несущих частотах.

В трехчастотном алгоритме РН значения числителя и знаменателя максимальны для частот  $f_2$  и  $f_3$ , поэтому применительно к ним требования к точности фазовых измерений для обеспечения согласованности шкал наиболее жесткие:

$$\delta r_1 = \text{int} \left( \sqrt{(P_3^2 + \Theta_3^2) \cdot 0,0124^2 + 0,5} \right) = \text{int} \left( \sqrt{(29^2 + 28^2) \cdot 0,0124^2 + 0,5} \right) = 0.$$

При погрешности измерения дальности 0,9 мм для НЧ  $f_2$  среднеквадратическая погрешность измерения дробной части ФЦ не превышает  $\sigma_\phi = 0,00375$ . В этом случае для нормального закона распределения предельная погрешность  $|\delta\phi| = 0,0124 > 3\sigma_\phi$ , и условие согласованности шкал выполняется с вероятностью 0,997.

Таким образом, для реализации алгоритмов быстрого разрешения неоднозначности фазовых измерений в системе ГЛОНАСС целесообразно в качестве несущих выбрать пред-

ложенные в выражениях (2) частоты 1602,018, 1246,014 и 1203,048 МГц, что позволит с использованием метода некранных шкал получить диапазон РН до 48,8 м по выборке одномоментных измерений на трех частотах или 6,8 м — при использовании метода СДВ на двух частотах.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пономарев В. А., Пономарев А. В., Пономарева Т. М., Бахолдин В. С. Разрешения неоднозначности в информационно-измерительных многошкальных приборах и системах. СПб: ВИКУ, 2001.
2. Пат. 2157547 РФ. Способ разрешения неоднозначности фазовых измерений / В. А. Пономарев, В. С. Бахолдин. 1999.
3. Пат. 2213979 РФ. Способ разрешения неоднозначности фазовых измерений в системе GPS / В. А. Пономарев, В. С. Бахолдин. 2003.
4. КА ГЛОНАСС-К2. Структура излучаемых навигационных радиосигналов L1SC, L1OC, L2SC, L2OC, L2 КСИ, L3OC с кодовым разделением частотных диапазонов L1, L2, L3: Интерфейсный контрольный документ. Версия 13, 17.09.2011 / Рос. науч.-исслед. ин-т космического приборостроения. М., 2011. 32 с.

#### Сведения об авторе

**Владимир Станиславович Бахолдин** — канд. техн. наук, доцент; Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, кафедра космической радиолокации и радионавигации, Санкт-Петербург; E-mail: bakholdin\_vs@mail.ru

Рекомендована кафедрой  
космической радиолокации  
и радионавигации

Поступила в редакцию  
11.03.14 г.

УДК 519.2

В. Н. АРСЕНЬЕВ, П. В. ЛАБЕЦКИЙ

### ОЦЕНИВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ТОЧНОСТИ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ РАКЕТЫ-НОСИТЕЛЯ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ПУСКОВ В РАЗЛИЧНЫХ УСЛОВИЯХ

Рассматривается задача оценивания характеристик точности системы управления ракеты-носителя по результатам испытаний в различных условиях. Предлагается новый подход к определению оператора приведения результатов испытаний к единым условиям, позволяющий повысить точность оценок.

**Ключевые слова:** система управления, ракета-носитель, точностные характеристики, условия пусков, неоднородные данные.

**Введение.** Качество решения задач, возлагаемых на космический аппарат (КА), существенно зависит от начальных параметров движения (фазовых координат) центра масс КА в момент его отделения от ракеты-носителя (РН). Фазовые координаты являются случайными, что обусловлено большим числом случайных возмущений, действующих на ракету-носитель и ее систему управления (СУ) на активном участке траектории [1].

Характеристики разброса фазовых координат РН в конце активного участка траектории или, как их часто называют, характеристики точности системы управления можно оценить, используя метод статистического моделирования возмущенного движения РН. Эти оценки могут отличаться от фактических значений характеристик точности из-за невозможности учета в модельном эксперименте совокупности факторов, оказывающих влияние на движение РН.