

УДК 621.396.967

Дугин Николай Александрович^{1,2}, снс, доктор физ-мат наук, профессор кафедры физики ФГБОУ ВО ВГУВТ, зав.отделом НИРФИ ННГУ им. Н.И. Лобачевского
e-mail: ndugin@yandex.ru,

Мартынов Никита Сергеевич¹, аспирант ФГБОУ ВО ВГУВТ
e-mail: prototip198@yandex.ru

¹ Волжский государственный университет водного транспорта, г. Нижний Новгород, Россия.

² НИРФИ ННГУ им. Лобачевского, г. Нижний Новгород, Россия.

ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ БОРТОВЫХ РАДИО-ИНТЕРФЕРОМЕТРИЧЕСКИХ СИСТЕМ ДЛЯ НАВИГАЦИОННЫХ ОПРЕДЕЛЕНИЙ

Аннотация. Рассматривается процедура измерения географических координат наземного объекта и его ориентации по сигналам НКА СРНС с помощью бортовых радиоинтерферометров. Представлены также алгоритм учета неидентичности опорно-поворотных устройств приемных антенн для малобазовых систем, позволяющих проводить упрощенные расчеты задержки сигналов в местной декартовой системе координат.

Ключевые слова: радиоинтерферометр, географические координаты, ориентация объекта, навигационные космические аппараты, антенны, базовое расстояние

Навигационные определения наземного объекта (морские и речные суда, самолеты, автомобили и т.д.) являются важнейшими элементами работы экипажа при эксплуатации судов, особенно, в незнакомой обстановке без четких ориентиров. В современных условиях чаще всего местоположение объекта определяется по сигналам навигационных космических аппаратов (НКА) глобальных спутниковых радионавигационных систем (СРНС - GPS, ГЛОНАСС, Галилео, Бейдоу). Сразу заметим, что число всех одновременно наблюдаемых на земле НКА превышает 10-15, их частотные диапазоны близки, что позволяет работать сразу по сигналам нескольких СРНС.

При решении навигационной задачи объектами-потребителями сигналов СРНС такими, например, как речные суда в сложной судовой обстановке, актуально не столько определение географических координат объектов, сколько получение оперативных сведений об их ориентации с целью определения направления и скорости движения. Принципы определения ориентации объектов по сигналам НКА с помощью фазоизмерительных систем обсуждались, например, в обзоре [1]. С этой же целью в работе [2] проработана задача применения бортовых радиоинтерферометрических комплексов для одновременного нахождения местоположения и ориентации объектов при измерении только разностей фаз квазишумовых сигналов не менее, чем от трех НКА. При этом искомый параметр определяется по шумовому (квазишумовому, фазоманипулированному) сигналу, кодовая информация не используется.

На рис.1 показана конфигурация приемного комплекса в составе 4 антенн, расположенных на удаленных частях судна и образующих 6 интерферометров с различными по величине и ориентации базами. При расчетах для измерения требуемых

параметров достаточно двух баз, однако большее число баз, кроме увеличения точности определения положения объекта при фиксированном времени измерений, позволяет решить проблему неопределенности измерения разности фаз 2π . При этом, естественно, увеличивается объем аппаратуры; выбор оптимального варианта зависит от класса объекта и требований к техническим параметрам комплекса.

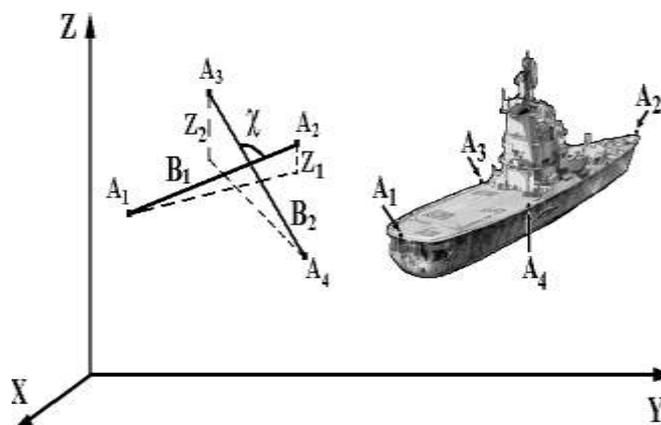


Рис.1

Оценки проводились для объекта «средних» размеров (около 15-20 м), исходя из длины базы в 100 рабочих длин волн (диапазон СРНС – (1.5 – 1.6) ГГц, длина волны 18–20 см). Получено, что погрешность определения географических координат объекта находится в пределах нескольких сантиметров, а погрешность определения азимута не более 10 угл. минут. Для непрерывного оперативного контроля положения объекта, особенно при его быстрых изменениях (качка морских судов, полет самолетов, вращение ИСЗ), необходимо дальнейшее решение задачи, основываясь на алгоритмах, полученных в [2].

В состав аппаратуры приемной интерферометрической системы должны входить как элементы аппаратуры приемников сигналов СРНС, так и субблоки радиоинтерферометров (чаще всего используемые в радиоастрономии) – корреляторы, системы фазовой калибровки, стандарты частоты и времени, регистрирующее устройство и т.д., а также бортовой компьютер для первичной и вторичной обработки получаемых данных с соответствующим программным обеспечением.

Точность измерения требуемых навигационных параметров зависит от точности задания или измерения параметров базовой линии интерферометра, которая определяется между точками пересечения осей вращения приемных антенн (либо между фазовыми центрами). Определение величин небольших базовых расстояний интерферометров грубо проводится геодезическими методами, поскольку антенны расположены на объектах с хорошо известными геометрическими размерами. Это позволит ускорить дальнейшую калибровку инструментов, включая линии связи, которая может проводиться по сигналам НКА с известными координатами [3].

Для повышения надежности приема относительно слабых сигналов НКА в приемном комплексе желательно иметь одну – две антенны с диаметрами зеркал порядка 0.5 - 1 м с опорно-поворотным устройством (ОПУ), позволяющим наводиться на нужный спутник. Возможно применение антенн с относительно узкими диаграммами направленности (70 – 90 градусов), направленных в разные точки небесной сферы, чтобы принимать сигналы как можно более удаленных друг от друга НКА. Это повышает точность измерений за

счет большей независимости условных уравнений в решаемой системе по разработанному в [2] алгоритму.

Если ОПУ антенн не имеют точки пересечения осей (не идентичны конструктивно), то величина базы интерферометра изменяется в зависимости от азимута источника, что требуется учесть при обработке данных измерений. На рис. 2 показана величина расхождения осей вращения r , за точку отсчета базы берется точка пересечения перпендикуляра от УМ оси с азимутальной осью.

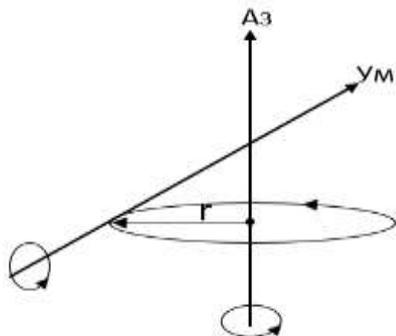


Рис.2

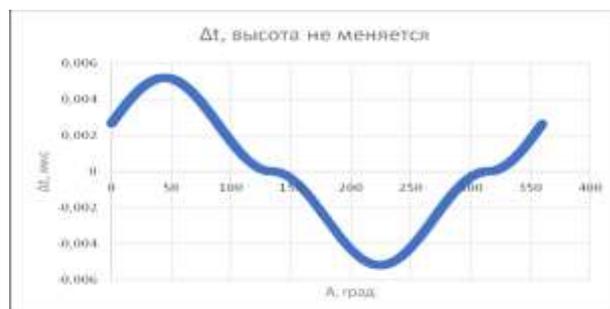


Рис.3

Решение задачи коррекции измеряемых данных (разности фаз, задержек, частот интерференции) на неидентичность ОПУ можно проводить в местной декартовой системе координат, поскольку размеры баз ограничены размерами объектов. Кроме того, при такой геометрии проекция вектора r на ось z (направление в зенит) равна нулю, что упрощает алгоритм расчета.

Поправка к задержке (или при пересчете – к разности фаз) из-за неидентичности антенн после соответствующих преобразований равна

$$\tau = \frac{\Delta D}{c} = \frac{r}{c} \cos^2(A_0 - A) \cos(h) \text{sign}(\cos \Delta A) \quad (1)$$

В соотношение (1) введен множитель «знак \cos » для сохранения непрерывности поправки, т.к. квадрат косинуса разности азимутов базы и источника приводит к изменению знака поправки.

Поправка к частоте интерференции равна

$$F_u = \frac{F_0}{c} \frac{\partial \Delta D}{\partial t} = \frac{F_0}{c} [2r \sin(\phi) \cos(h) \cos(A_0 - A) (\sin(A_0 - A) - \sin(A_0)) + 2r \sin(h) \cos(\phi) \cos^2(A_0 - A) \sin(A)] \quad (2)$$

где F_0 — рабочая частота, ϕ — широта места.

На рис.3 для примера приведен расчет поправки на неидентичность антенн к пространственной задержке для радиоастрономического интерферометра с базой около 800 м с азимутом 44.5° ; одна антенна имеет ОПУ с пересекающимися осями вращения, у другой оси разнесены на 2.2 м. Максимум поправки в соответствии с соотношением (1) имеет место при азимуте источника равном азимуту базы.

Выводы

Рассмотрен способ одновременного определения местоположения и ориентации наземного объекта по сигналам НКА СРНС с применением бортовых радиоинтерферометрических систем. Необходимо измерять одновременно разности фаз сигналов от трех навигационных аппаратов по шумовому сигналу, т.е. для измерения фазы кодовая информация НКА не используется.

При применении антенн различных конструкций с непересекающимися осями вращения требуется учет изменения базового расстояния в зависимости от азимута источника излучения.

Приводятся соотношения для поправок к измеряемым величинам пространственной задержки и частоте интерференции для коррекции их на неидентичность антенн при калибровке малобазовых интерферометрических инструментов.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки: госзадание FSWR-2023-0038.

Список литературы:

1. Абросимов В.Н., Алексеева В.И., Гребенко Ю.А., Лукин В.И., Мищенко И.Н., Новиков И.А. Использование системы NAVSTAR для определения угловой ориентации объектов //Зарубежная радиоэлектроника. – 1989. – №1. – С.46.

2. Дугин Н. А. Разработка методов и устройств для высокоточных измерений в радиоастрономии и радиоинтерферометрии. Диссертация на соискание ученой степени доктора физико-математических наук. — Нижний Новгород. – 2007.

3. Nechaeva M., Adamchik A., Bezrukovs VI, Dugin N., Shmeld I., Tikhomirov Yu. Measurements of parameters of interferometer “Irbene - Nizhnij Novgorod” at reception of signals of space satellites GLONASS and GPS. //Latvian Journal of Physics and Technical Sciences – 2016. – V.53. – №5. – P. 24-30.

FEATURES OF APPLICATION OF ONBOARD RADIO-INTERFEROMETRIC SYSTEMS FOR NAVIGATION DETERMINATIONS

Nikolai A. Dugin, Nikita S. Martynov

Annotation. The procedure for measuring the geographic coordinates of a ground object and its orientation according to the signals of the NSC SRNS using onboard radio interferometers is considered. An algorithm is also presented for taking into account the non-identity of the turntables of receiving antennas for low-base systems, which allow simplified calculations of the signal delay in the local Cartesian coordinate system.

Keywords: radio interferometer, geographic coordinates, object orientation, navigation spacecraft, antennas, base distance.

