

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ АЗИМУТА БАЗОВОГО НАПРАВЛЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СПУТНИКОВЫХ НАВИГАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

к.т.н. С.Н. Флерко, В.Н. Дейнеко, О.И. Вотяков
(представил д.т.н., проф. А.И. Стрелков)

Изложена методика определения ориентации базового направления в пространстве с использованием современных методов координатно-временного обеспечения по сигналам спутниковых систем GPS и ГЛОНАСС.

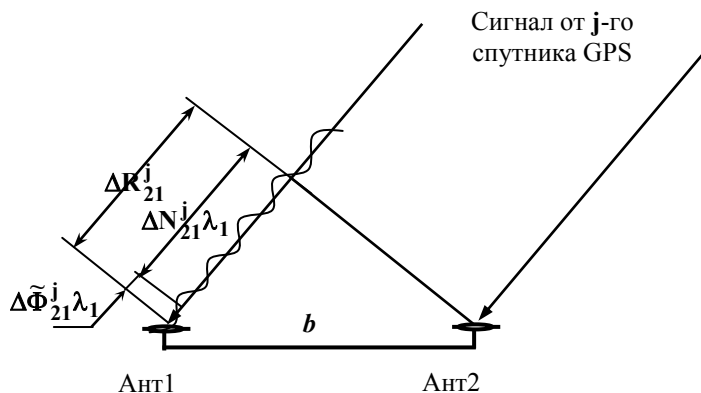
Задача высокоточного определения ориентации фиксированного базового направления мобильного объекта относительно местного направления на север является одной из ключевых в комплексе задач топогеодезического обеспечения необорудованных позиционных районов. Традиционно такого рода задачи решаются с использованием гирокомпаса, который обладает достаточно высокой стоимостью. Современное развитие средств спутниковой навигации и геодезии, использующих наблюдения текущих параметров спутников GPS и ГЛОНАСС по фазе несущей навигационных сигналов, открывает новые возможности в решении данной задачи.

Схема организации измерений предполагает следующее. Пусть имеется две приемные антенны (Ант1 и Ант2) и навигационный приемник, способный выполнять и обрабатывать поступающие от них наблюдения относительно всех «видимых» спутников GPS. Антенны разносятся в пространстве, формируя базовое направление, относительно которого выполняются все необходимые расчеты. Принцип выполнения измерений поясняется на рис. 1, а уравнения измерений на момент времени t могут быть представлены в виде:

$$\Delta R_{21}^j = \Delta \tilde{\Phi}_{21}^j \lambda_1 + \Delta N_{21}^j \lambda_1 + \xi_{\text{мн}}^j + \xi_{\text{ш}}^j, \quad (1)$$

где ΔR_{21}^j – разность дальностей между Ант2 и Ант1 относительно j -го спутника; $\Delta \tilde{\Phi}_{21}^j$ – разность измеренных значений расхождений фаз принятого сигнала и сигнала опорного генератора в точках стояния Ант2 и Ант1; $\lambda_1 = 19,2$ см – длина волны несущей навигационного сигнала GPS в диапазоне L1; $\Delta N_{21}^j = N_2^j - N_1^j$ – разность целочисленных неопределенностей соответствующих фазовых измерений; $\xi_{\text{мн}}^j$ – погрешность

измерений, вызванная многолучевостью распространения навигационных сигналов; $\xi_{ш}^j$ – флуктуационная погрешность измерений, вызванная



аппаратными шумами приемника.

Рис. 1. Принцип организации измерений

С учетом относительно небольших расстояний между антеннами (единицы-десятки метров) и значимых расстояний до наблюдаемых спутников (≥ 20000 км) при формировании разности (1) из уравнений наблюдений практически исключаются все систематические погрешности (ионосферные, тропосферные и эфемеридно-временные), что обусловлено их пространственной корреляцией.

Задача отыскания геодезического азимута базового направления «Ант1-Ант2» сводится к следующему алгоритму.

1. Согласно системе уравнений (1) определяются координаты вектора-базы «Ант1-Ант2» ($\Delta X_{21}, \Delta Y_{21}, \Delta Z_{21}$) в геоцентрической прямоугольной системе координат (СК).
2. Задается местная прямоугольная СК с началом в точке нахождения фазового центра Ант1 и одной из осей (ось X), направленной по местному меридиану на север.
3. Рассчитываются значения координат базового вектора в местную СК с использованием матрицы пересчета.
4. Определяется угол α между проекцией базового направления «Ант1-Ант2» на плоскость местной СК, совмещенной с плоскостью местного горизонта, и осью СК, направленной на север (рис.2):

$$\left\{ \begin{array}{l} \alpha = \arcsin \frac{\Delta z}{\sqrt{(\Delta z_{21})^2 + (\Delta x_{21})^2}}; \\ \alpha = \arccos \frac{\Delta x}{\sqrt{(\Delta z_{21})^2 + (\Delta x_{21})^2}}. \end{array} \right. \quad (2)$$

Реализация представленного выше алгоритма затруднена уже на первом шаге проблемой разрешения целочисленной неопределенности

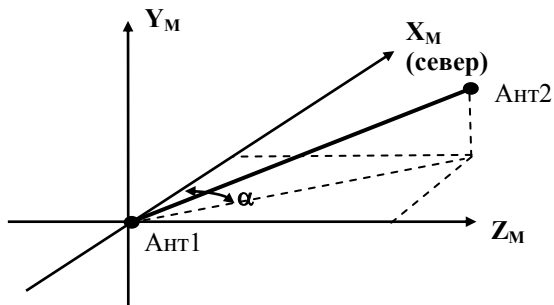


Рис. 2. Расположение измерительного комплекса в местной СК, α – искомый угол

при решении системы уравнений (1). Фазометры каждого канала описанной системы измеряют только дробные части цикла фазы несущей, что при формировании разности даст соответственно разность дробных циклов фазы $\Delta\tilde{\Phi}_{21}^j$. Тогда как целое число циклов фазы ΔN_{21}^j или целое число

длин волн λ_1 «уложенное» на расстоянии ΔR_{21}^j остается неизвестным и для решения задачи подлежит определению. В принципе решение задачи может быть достигнуто с использованием однозначных кодовых измерений. Однако, величины погрешностей из-за многолучевости ξ_{MN}^j и шумовой погрешности $\xi_{\text{ш}}^j$ кодовых наблюдений выше соответствующих погрешностей фазовых наблюдений практически на два порядка, что существенно скажется на точности решения конечной задачи. Для сравнения уровень шумовой (инструментальной) погрешности кодовых наблюдений в современных GPS приемниках составляет десятки сантиметров (СКО), тогда как фазовых – единицы миллиметров (потенциально 1 % и менее длины волны) [1]. Тем не менее, использование кодовых измерений совместно с фазовыми может существенно сузить границы неоднозначности последних.

Линеаризованные уравнения (1) можно представить в векторно-матричном виде:

$$\bar{\rho} = \bar{\Phi}\lambda_1 + \Delta\delta\bar{X} + \Delta\bar{N}\lambda_1 + \bar{\xi}_{\Phi}, \quad \bar{\xi}_{\Phi} \sim N(0, K_{\Phi}), \quad (3)$$

где $\bar{\rho}$ – вектор расчетных значений разностей псевдодальностей по всем видимым спутникам; $\bar{\Phi}$ – вектор измеренных значений разностей фаз

$\Delta\tilde{\Phi}_{21}^j$; \mathbf{A} – матрица частных производных измеряемых параметров по определяемым; $\delta\tilde{\mathbf{X}}$ – вектор приращений координат базового вектора «Ант1-Ант2»; $\Delta\tilde{\mathbf{N}}$ – вектор разностей целочисленных неоднозначностей; $\tilde{\xi}_{\Phi}$ – вектор флуктуационных погрешностей фазовых измерений, включая шумы приемника и многолучевость, распределенных по нормальному закону с нулевым средним и корреляционной матрицей \mathbf{K}_{Φ} .

Для кодовых измерений систему можно переписать в виде:

$$\bar{\rho} = \bar{\mathbf{S}} + \mathbf{A}\delta\tilde{\mathbf{X}} + \tilde{\xi}_{\kappa}, \quad \tilde{\xi}_{\kappa} \sim \mathbf{N}(\mathbf{0}, \mathbf{K}_{\kappa}), \quad (4)$$

где $\bar{\mathbf{S}}$ – вектор измеренных значений разностей псевдодальностей.

Решение уравнения (4) может быть получено с использованием итерационной процедуры по методу наименьших квадратов, что в упрощенном виде может быть представлено как

$$\delta\tilde{\mathbf{X}} = (\mathbf{A}^T \mathbf{W} \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{W} (\bar{\rho} - \bar{\mathbf{S}}), \quad (5)$$

где \mathbf{W} – весовая матрица измерений, равная обращенной корреляционной матрице (информационная матрица Фишера).

Решение (5) может быть использовано для начальной инициализации целочисленной неопределенности, т.е.

$$\Delta\tilde{\mathbf{N}} = (\bar{\rho} - (\bar{\Phi} + \mathbf{A}\delta\tilde{\mathbf{X}})) / \lambda_1. \quad (6)$$

Полученное решение (6) сузит область неоднозначности фазовых измерений практически до уровня флуктуационной составляющей погрешности кодовых измерений (без учета геометрии измерительной системы), что для современных GPS приемников геодезического класса означает уровень первых дециметров (0,1...0,5 м – СКО). Тем не менее, с учетом длины волны несущей диапазона L1, которая составляет 19,2 см решения (6) будет недостаточно.

Так как в основе выполнения фазовых измерений лежат интервальные методы, для снижения уровня погрешностей кодовых измерений и в итоге дальнейшего сужения области неоднозначности можно применить их сглаживание (фильтрацию) с помощью неоднозначных измерений фазы несущей с использованием рекуррентных алгоритмов. Предположим, что все наблюдения выполняются в течение эпохи времени $\mathbf{T} = (\mathbf{t}_1, \mathbf{t}_n)$ с темпом съемки 1 Гц. В основе интервального метода лежит принцип начальной фиксации значения целочисленной неоднозначности, когда в пределах эпохи значение неоднозначности остается постоянным, а ее приращения за счет движения спутника отслеживаются с использованием интегральных доплеровских измерений. В этом случае рекуррентный алгоритм сглаживания на каждом шаге процесса можно записать в виде [2]:

$$S_{\text{экср}}(t_i) = S(t_i) + (\Phi(t_i) - \Phi(t_{i-1}));$$

$$S_{\text{сгл}}(t_i) = \frac{1}{2}(S_{\text{экср}}(t_i) + S_i(t_i)), \quad i = \overline{(\mathbf{1}, \mathbf{n})},$$

где $S_{\text{экср}}(t_i)$ – экстраполированное значение измеренной кодовой псевдодальности; $S(t_i)$ и $\Phi(t_i)$ – измеренные значения кодовой и фазовой (в метрах) псевдодальности; $S_{\text{сгл}}(t_i)$ – сглаженное значение кодовой псевдодальности.

Реализация данного алгоритма возможна только при условии отсутствия скачков в фазовых измерениях (cycle slip) или при условии применения специальных методов их устранения. В потенциале такой подход может снизить уровень шумовой составляющей в корень из \mathbf{n} раз, где \mathbf{n} – количество измерений за полную эпоху. Например, на интервале пяти минут при темпе 1 Гц можно снизить шумовую составляющую кодовых измерений с 0,5 м до уровня 3 см, что является достаточным для использования решения (5) при разрешении фазовой неоднозначности. При использовании изложенной методики важное значение имеет погрешность из-за многолучевости распространения навигационных сигналов, которая при фазовых измерениях достигает значений нескольких сантиметров, а при кодовых нескольких метров. Данная погрешность не поддается фильтрации. По этой причине особое внимание следует уделять выбору антенных устройств, обеспечивающих устойчивую режекцию отраженных сигналов и мест проведения наблюдений.

При реализации всех перечисленных требований представленная методика позволит реализовать точность определения ориентации заданного базового направления относительно местного направления на север на уровне единиц угловых минут в зависимости от величины измерительной базы между приемными антеннами.

ЛИТЕРАТУРА

1. Hoyle V.A., Lachapelle G., Cannon M.E., Wong C. *Low-Cost Receivers and Their Feasibility for Attitude Determination // Proc. at the ION Nat. Techn. Meet. – San Diego, CA, USA. – 28 – 30 January 2002. – P. 1 – 10.*
2. *Глобальна система визначення місцезнаходження (GPS): Теорія і практика / Б. Гофманн-Велленгоф, Г. Ліхтенеггер, Д. Коллінз, переклад з англ. під ред. Я.С. Яцківа. – К.: Наукова думка, 1995. – 380 с.*

Поступила 13.08.2002

ФЛЕРКО Сергей Николаевич, канд. техн. наук, зам. начальника НИО научного центра при ХВУ. Окончил ХВУ в 1994 году. Область научных интересов – системы спутниковой навигации и геодезии. E-mail: flerko@ukr.net.

ДЕЙНЕКО Валерий Николаевич, начальник АХГ научного центра при ХВУ. Окончил ХВУ в 1997 году. Область научных интересов – системы спутниковой навигации и

геодезии.

ВОТЯКОВ Олег Иванович, адъюнкт ХВУ. Окончил ХВВКИУ РВ в 1986 году. Область научных интересов – системы спутниковой навигации и геодезии.
