

АЛГОРИТМЫ КИНЕМАТИЧЕСКОГО МЕТОДА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДАЛЬНОСТИ

Н.Е. Армионов, Л.Н. Армионов

Часть 2

Изложенные алгоритмы кинематического метода определения дальности между фазовыми центрами антенн в спутниковых радиоперелиниях позволяют отказаться от измерений дальностей с использованием дальномерных кодовых последовательностей и перейти к определению дальности по фазовым измерениям на несущих частотах радиосигналов в дифференциальном радиально-скоростном режиме измерений.

Ключевые слова: линейная орбитальная скорость, угловая скорость, радиальная скорость, радиальный доплеровский сдвиг частоты, фаза несущей, приращение фазы, спутниковая интерферометрия

Исходной предпосылкой для разработки инженерной реализации концепции перспективной автономной, глобальной, многофункциональной, интегрированной спутниковой системы стало структурное и техническое несовершенство существующих спутниковых систем и потребность в создании в сложившихся условиях перспективных, интегрированных, конкурентоспособных, глобальных, автономных систем навигации, геодезии, связи, наблюдения и управления, обеспечивающих высокую точность навигационных измерений и навигационно-геодезических определений, высокую надежность, помехоустойчивость и достоверность навигации, геодезии, а также связи, наблюдения и управления на самом высоком уровне.

В евклидовом трехмерном пространстве измерение интервала между двумя точками дает расстояние (дальность) между ними. Измеряется время распространения электромагнитных волн между спутниками и пользователями, а искомое расстояние R вычисляется по формуле:

$$R = c \cdot t.$$

где c — скорость света.

Существует также, например, кинема-

тический метод определения дальности между фазовым центром спутниковой навигационной антенны и фазовым центром антенны пользовательского терминала, как отношение тангенциальной скорости наблюдения V (линейной орбитальной скорости фазового центра спутниковой навигационной антенны) к угловой скорости $\dot{\theta}$. В кинематическом методе определения дальностей между спутниками и пользователями время распространения электромагнитных волн не измеряется и не используется. Дальность между фазовыми центрами вычисляется с использованием выражения:

$$R = V / \dot{\theta}.$$

где $\dot{\theta}$ — угловая скорость фазового центра спутниковой антенны относительно направления «фазовый центр антенны спутника — фазовый центр антенны наземного радиомаяка», «фазовый центр антенны спутника — фазовый центр пользовательского терминала»; V — линейная орбитальная скорость фазового центра спутниковой навигационной антенны, перпендикулярная R .

В основу как алгоритма кинематического метода определения дальности, так и алгоритмов глобальной съемки

алгоритмов глобальной съемки карты гравитационного поля Земли, автономного местопределения спутников, пользователей спутниковых систем в представленной МИСС положена дифференциальная радиально-скоростная методика измерения приращений фаз несущих частот (разностей дальностей), обусловленных доплеровским сдвигом частоты. Дифференциальная радиально-скоростная методика базируется на измерениях доплеровских смещений частоты, скорости измерения смещений, разности доплеровских смещений, которые приобретают излученные колебания несущих номинальной частоты на трассах распространения между окончательными пунктами, находящимися в относительном движении с применением спутниковых линейных интерферометров и систем слежения за несущими частотами сигналов, принимаемыми спутниковыми приемными устройствами и приемными устройствами пользователей.

При измерениях с применением дифференциальной радиально-скоростной методики мерный интервал сравнительно мал (единицы секунд), и за время T_M измерение приращений фаз (приращений дальностей), обусловленных доплеровским сдвигом частоты, можно считать линейным. Разделив результат измерений приращений фаз на T_M , получим значение доплеровской частоты (радиальной скорости), пропорциональное мгновенному значению, а разделив затем на волновое число $2\pi/\lambda$, получим значение радиальной скорости, относящееся к середине мерного интервала T_M . Соответственно, разделив измеренные значения приращений фаз на волновое число $2\pi/\lambda$, получим значение разности дальностей.

Классическое представление принципа работы интерферометра основано на измерении разности фаз колебаний (разности дальностей), принимаемых двумя антеннами, разнесенными в пространстве (радиопеленгатор). Однако прием может осуществляться и на одну антенну, но тогда излучение принимаемого сигнала должно осуществляться разнесенными антеннами (фазовый радиомаяк). Демонстрацией работы фазового радиомаяка является прием пользователями спутниковых систем на мерных интервалах радиосигналов, излучаемых

движущимися спутниками (рис. 1). Расстояние, пройденное антенной спутника (фазовым центром) за мерный интервал, называется базой (базовым расстоянием d). Наземные радиомаяки и пользователи спутниковых систем удалены от центров баз на расстояния, во много раз превышающие d . В этом случае направления прихода сигналов спутников на мерных интервалах можно считать параллельными, и можно записать разность расстояний в виде [1]

$$\Delta R = R_{i+1} - R_i = d \cdot \sin \alpha_i;$$

$$\alpha_i = \pi/2 - \theta_i,$$

$$i = 1, 2, \dots,$$

где α_i – угол между направлением на пользователя (фазовый центр антенны АП) и нормалью к базе, проходящей через ее центр; $\pi = 3,1415\dots$

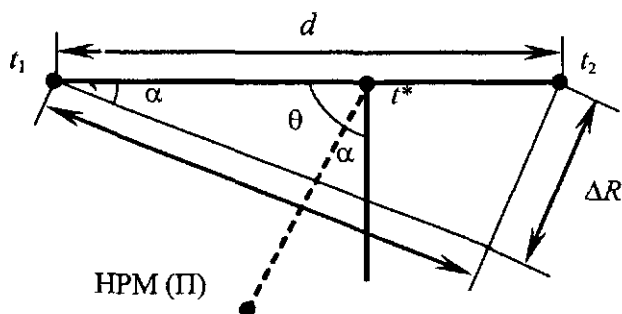


Рис. 1. Иллюстрация фазового метода пеленгования

Направление «пользователь – спутник», «спутник – радиомаяк» определяется направляющим углом θ_i , отсчитываемым относительно базы. Направление часто характеризуется также величиной $\cos \theta_i$, которая носит название «направляющий косинус».

Зная величину базы и измеряя тем или иным способом разность расстояний ΔR , можно определить направление на пеленгуемый спутник (источник излучения).

При фазовом методе измеряется разность фаз $\Delta\varphi$ колебаний. Если длина волны принимаемых колебаний равна λ , то

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi d}{\lambda} \sin \alpha_i = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta R;$$

$$\Delta R = \frac{\Delta\varphi \cdot \lambda}{2\pi},$$

где $\frac{2\pi \cdot d}{\lambda}$ носит название «крутизны пеленгационной характеристики» или «чувствительности»,

$$\frac{2\pi}{\lambda} \cdot d \cdot \cos \theta_r = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot (R_{i+1} - R_i).$$

Дифференцируя уравнение по времени, получим

$$-\frac{2\pi}{\lambda} \cdot d \cdot \dot{\theta}_r \cdot \sin \theta_r = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot (\dot{R}_{i+1} - \dot{R}_i).$$

Отсюда

$$|\dot{\theta}_r^{\text{пр.с}}| = \frac{\Delta \dot{R}_i^{\text{пр.с}}}{d \cdot \sin \theta_r^{\text{пр.с}}}, \quad (1)$$

$$|\dot{\theta}_r^{\text{пр.п}}| = \frac{\Delta \dot{R}_i^{\text{пр.п}}}{d \cdot \sin \theta_r^{\text{пр.п}}}.$$

Поскольку разность фаз $\Delta \varphi$ (разность доплеровских частот) пропорциональна направляющему косинусу угла прихода вол-

ны, определение направления фазовым методом сводится к измерению разности дальностей.

Таким образом, чувствительность спутникового интерферометра, а, следовательно, и точность пеленгации, точность измерения радионавигационных параметров растут с увеличением отношения d/λ .

Для уменьшения погрешностей, обусловленных флюктуацией фазы за счет среды, в которой распространяются радиоволны, а также за счет отсчетов фазы и других факторов, необходимо чтобы размер базы превышал эффективный радиус корреляции неоднородностей среды.

Геометрическая интерпретация измерений радионавигационных параметров в режиме спутникового фазового радиомаяка и в режиме спутникового фазового радиопеленгатора с использованием дифференциальной радиально-скоростной методики представлена на рисунках 2 и 3.

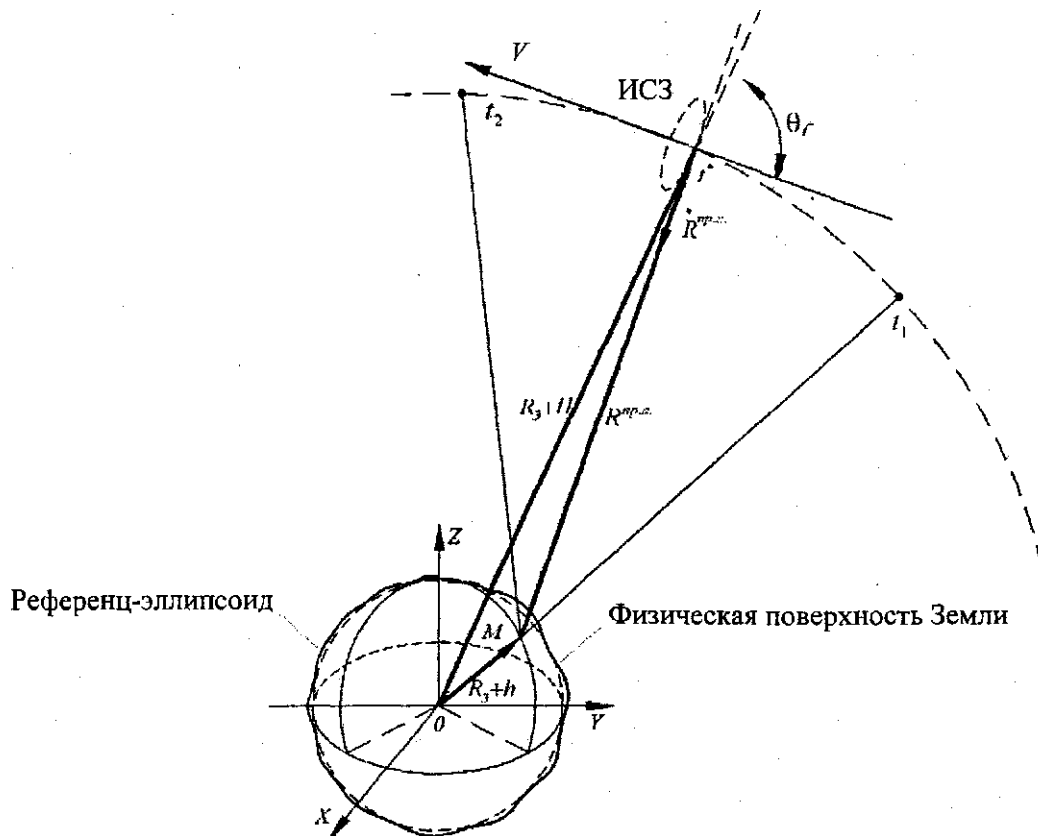


Рис. 2. Геометрическая иллюстрация дифференциальной радиально-скоростной методики фазовых измерений и определения значений геоцентрического радиус-вектора с использованием спутникового интерферометра в режиме радиопеленгатора

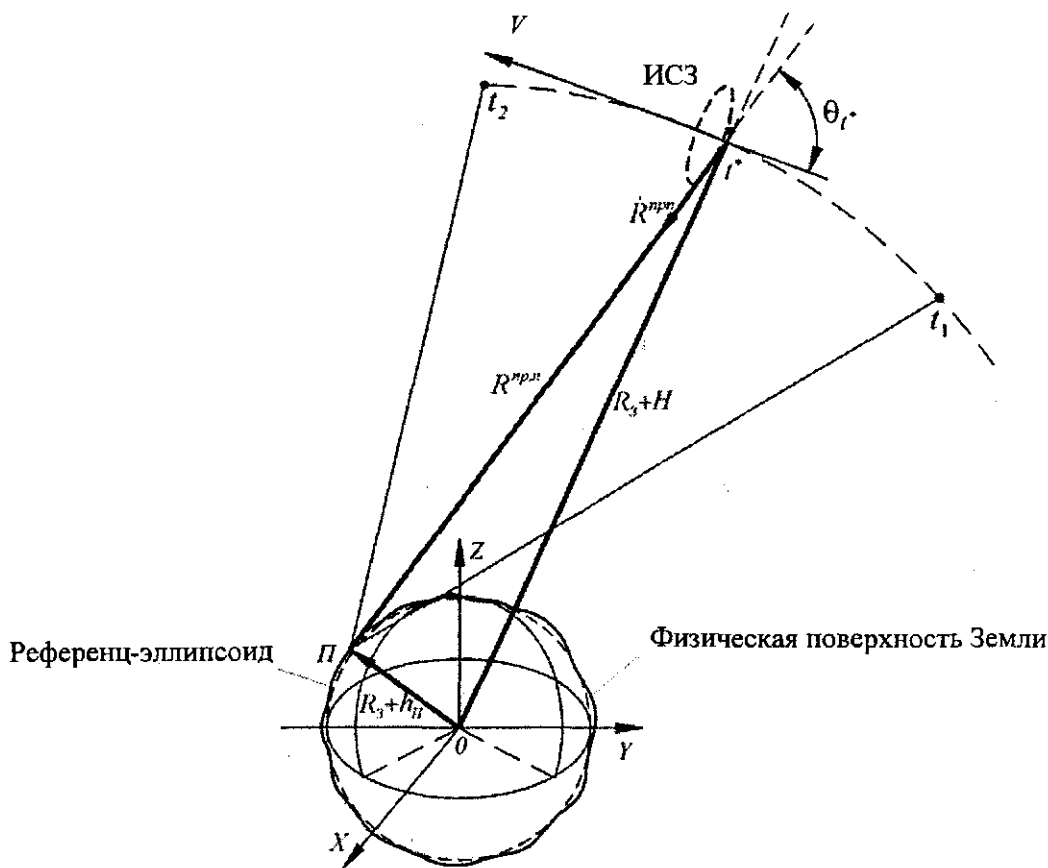


Рис. 3. Геометрическая иллюстрация дифференциальной радиально-скоростной методики фазовых измерений и определения значений геоцентрического радиус-вектора с использованием спутникового интерферометра в режиме радиомаяка

Пространственное визирование с использованием спутниковых радиомаяков (линейных интерферометров) позволяет обозначить угловое положение базовых расстояний d и линий, соединяющих фазовые центры антенн радиомаяков и фазовые центры антенн спутников, а также фазовые центры антенн спутников и фазовые центры антенн пользователей.

Базовые линии и линии визирования удобно задавать значениями направляющих углов α , β , γ , заключенных между этими линиями и координатными осями. Вместо углов можно употреблять значения их косинусов ($\cos \alpha$, $\cos \beta$ и $\cos \gamma$), что удобно для нахождения через эти значения соответствующих значений слагаемых координат по осям. Из направляющих углов только два являются независимыми, а третий определяется через них.

Одним из видов навигационных измерений является метод измерения приращений фаз несущих навигационных радиосигналов

с использованием дифференциальной радиально-скоростной методики.

Для измерения радионавигационного параметра – набега фаз колебаний несущих частот навигационных радиосигналов (разностей дальностей), обусловленных доплеровским сдвигом частоты, с применением дифференциальной радиально-скоростной методики, используются системы слежения за несущими (ССН) приемных устройств спутников-ретрансляторов (ПУСР) и ССН аппаратуры пользователей (АП).

ССН предназначены для слежения за фазой несущих, выделения информации и измерения доплеровских сдвигов частот. Для обеспечения быстрой синхронизации по несущей используется кольцо Цифровой Фазовой Автоматической Подстройки Частоты (ЦФАПЧ). Кольцо фазовой подстройки частоты отслеживает изменение частоты входного сигнала. Информация об изменении частоты входного сигнала имеется в цепи управления частотой подстраиваемого генератора, управляемого напряжением

(ГУН), с помощью которого частота генерируемого им сигнала поддерживается равной частоте входного сигнала.

Кольцо ЦФАПЧ относительно просто и с высокой точностью позволяет измерить на мерном интервале набег нециклической фазы выходного колебания, то есть фазы, изменяющейся в пределах, не ограниченных интервалом длиной 2π . Это дает возможность применять относительно простые квазиоптимальные алгоритмы измерений приращений фаз по сигналу, замаскированному шумом [2].

Измеренные значения набега фаз с помощью ССН ПУСР $\Delta\varphi_{изм,}^{пр.с}$ и ССН АП $\Delta\varphi_{изм,}^{пр.п}$ включают в себя как основную (рабочую) составляющую фазы $\Delta\varphi_{Д изм,}^{пр.с}$, $\Delta\varphi_{Д изм,}^{пр.п}$, обусловленные эффектом Доплера, так дополнительные составляющие фазы $\delta\varphi_{ш}^{пр.с}$, $\delta\varphi_{ш}^{пр.п}$, вызванные рассогласованием временных шкал в радиолиниях «радиомаяки – спутники», «спутники – пользователи» соответственно

$$\Delta\varphi_{изм,}^{пр.с} = \Delta\varphi_{Д изм,}^{пр.с} + \delta\varphi_{ш}^{пр.с};$$

$$\Delta\varphi_{изм,}^{пр.п} = \Delta\varphi_{Д изм,}^{пр.п} + \delta\varphi_{ш}^{пр.п}.$$

При дифференциальном радиально-скоростном режиме измерений можно считать, что неизвестные приращения фаз, обусловленные нестабильностью частот опорных генераторов конечных пунктов радиоизмерительных трасс, условиями распространения навигационных радиосигналов, фазовыми характеристиками антенн, многолучевостью распространения сигналов и другими факторами, сохраняются на протяжении измерительного сеанса постоянными и в процессе измерений разностей фаз взаимно компенсируются. Поэтому в выражениях, определяющих значения измеренных разностей фаз (приращений фаз), они отсутствуют.

С целью более существенного уменьшения дисперсии фазовых измерений технология измерения набега фаз с помощью рассматриваемой методики предусматривает еще и вторичное усреднение близкое к оптимальному. Вторичное усреднение измерений производится путем измерения усред-

ненных значений $\overline{\Delta\varphi_{изм,}^{пр.с}}$, $\overline{\Delta\varphi_{изм,}^{пр.п}}$ набега фаз на первой и на второй половинах мерного интервала и образования затем их разностей (двойных разностей фаз).

В этом случае в измеренных значениях разностей набега фаз, учитывая, что неизвестные расхождения временных шкал сохраняются на протяжении измерительного сеанса постоянными, также взаимно компенсируются, и в конечных измеренных значениях радионавигационного параметра они будут отсутствовать.

$$\overline{\Delta\varphi_{изм,}^{пр.с}} = \Delta\varphi_{Д изм,}^{пр.с};$$

$$\overline{\Delta\varphi_{изм,}^{пр.п}} = \Delta\varphi_{Д изм,}^{пр.п}.$$

Таким образом, рассмотренная дифференциальная радиально-скоростная методика измерений разности набега фаз колебаний несущих частот навигационных радиосигналов с двойным усреднением на мерных интервалах позволяет практически мгновенно производить высокоточные измерения текущих значений радионавигационных параметров, являющихся основой вначале для определения навигационных параметров, а затем и установления функциональных навигационных зависимостей (алгоритмов) решения навигационной задачи.

Основное достоинство дифференциального радиально-скоростного метода измерений навигационных параметров – отсутствие в измерениях систематических погрешностей, погрешностей, обусловленных расхождением шкал времени и частот генераторов в радиолиниях «радиомаяки – спутники», «спутники – пользователи-абоненты», влиянием ионосферы, тропосферы, многолучевостью распространения радиосигналов, фазовыми характеристиками антенн, гравитационным полем Земли, радиационным потоком, излучаемым Солнцем, влиянием на движение спутников лобового сопротивления и другими факторами.

Рассмотренные фазовые измерения с применением дифференциальной радиально-скоростной методики, произведенные как спутниковой аппаратурой, так и аппаратурой пользователей, позволяют произвести синхронизацию шкал времени спутников и оценить точное время. Синхронизация шкал

времени и оценка точного времени производится соответственно путем компенсации расхождений бортовых шкал времени (БШВ) относительно системной шкалы времени (СШВ) и вычисления (косвенного измерения) поправок к шкалам времени спутников $\delta\varphi_{ш}^{пр.с}$ и пользователей $\delta\varphi_{ш}^{пр.п}$ путем сравнения измеренных значений приращений фаз $\Delta\varphi_{изм}^{пр.с}$, $\Delta\varphi_{изм}^{пр.п}$ с вторично-усредненными значениями $\overline{\Delta\varphi_{изм}^{пр.с}}$, $\overline{\Delta\varphi_{изм}^{пр.п}}$ при необходимости

$$\delta\varphi_{ш}^{пр.с} = \Delta\varphi_{изм}^{пр.с} + \overline{\Delta\varphi_{изм}^{пр.с}};$$

$$\delta\varphi_{ш}^{пр.п} = \Delta\varphi_{изм}^{пр.п} + \overline{\Delta\varphi_{изм}^{пр.п}}.$$

Или, что то же самое,

$$\delta R_{ш}^{пр.с} = \Delta R_{изм}^{пр.с} + \overline{\Delta R_{изм}^{пр.с}};$$

$$\delta R_{ш}^{пр.п} = \Delta R_{изм}^{пр.п} + \overline{\Delta R_{изм}^{пр.п}};$$

где $\Delta R_{изм}^{пр.с}$, $\Delta R_{изм}^{пр.п}$ – приращения дальностей, измеренные без применения вторичного усреднения результатов измерений; $\overline{\Delta R_{изм}^{пр.с}}$, $\overline{\Delta R_{изм}^{пр.п}}$ – приращения дальностей с применением вторичного усреднения.

В современной спутниковой навигационной аппаратуре измерение доплеровского сдвига частоты (радиальной скорости) основано на измерении именно приращений фаз (приращений дальностей) на частоте несущей.

Алгоритм оценки доплеровских сдвигов частоты Ω_d с применением спутникового интерферометра основан на суммировании управляющего кода генераторов, управляющих напряжением систем слежения за несущими

$$\Delta Z_{уССН} = Z_{уССН} + \Delta Z_{уССН},$$

где $Z_{уССН}$ – номинальное значение управляющего кода, соответствующее нулевому значению доплеровского сдвига $\Omega_d = 0$.

В соответствии с этим алгоритмом в течение мерного интервала $0 \dots T_M$ суммируют отсчеты $\Delta Z_{уССН}$, вычисляя тем самым набег фазы выходного колебания за счет доплеровского сдвига от начала мерного интервала до текущего дискретного момента $N_M [2]$:

$$\Delta\varphi_{изм}^{пр.с} [N_M] = 2\pi \cdot \Delta F \cdot T_H \sum_{N=1}^{N_M} \Delta Z_{уССН} [N];$$

$$\Delta\varphi_{изм}^{пр.п} [N_M] = 2\pi \cdot \Delta F \cdot T_H \sum_{N=1}^{N_M} \Delta Z_{уССН} [N],$$

где ΔF – шаг квантования перестройки синтезатора несущей частоты; T_H – время накопления; N – порядковый номер числа, вводимого в ЭВМ (отношение времени накопления к периоду дискретизации). Оценку доплеровского сдвига частоты можно получить, разделив приращение $\Delta\varphi_{изм}(T_M)$ на мерный интервал T_M :

$$\Omega_d^{пр.с} = \frac{\Delta\varphi_{изм}^{пр.с}(T_M)}{T_M} = \frac{2\pi \cdot \Delta F}{N_M} \sum_{N=1}^{N_M} \Delta Z_{уССН} [N];$$

$$\Omega_d^{пр.п} = \frac{\Delta\varphi_{изм}^{пр.п}(T_M)}{T_M} = \frac{2\pi \cdot \Delta F}{N_M} \sum_{N=1}^{N_M} \Delta Z_{уССН} [N];$$

где $N_M = T_M / T_H$ – число отсчетов на мерном интервале, $T_M = t_{i+1} - t_i$ – длительность мерного интервала; t_{i+1} , t_i – положения спутников на орбите, являющиеся границами отсчета радионавигационного параметра.

Дисперсию фазовых измерений, обусловленную воздействием шума N_0 на ССН, можно еще существенно уменьшить с помощью вторичного усреднения следующим образом: получить усредненные значения $\overline{\Delta\varphi_{изм1}}$ и $\overline{\Delta\varphi_{изм2}}$ на первой и второй половинах мерного интервала

$$\overline{\Delta\varphi_{изм1}^{пр.с}} = \frac{\sum_{N=1}^{\frac{N_M}{2}} \Delta\varphi_{изм1}^{пр.с} [N_M]}{\frac{N_M}{2}};$$

$$\overline{\Delta\varphi_{изм1}^{пр.п}} = \frac{\sum_{N=1}^{\frac{N_M}{2}} \Delta\varphi_{изм1}^{пр.п} [N_M]}{\frac{N_M}{2}};$$

$$\overline{\Delta\varphi_{изм2}^{пр.с}} = \frac{\sum_{N=\frac{N_M}{2}+1}^{N_M} \Delta\varphi_{изм2}^{пр.с} [N_M]}{\frac{N_M}{2}};$$

$$\overline{\Delta\varphi}_{\text{изм2}}^{\text{пр.п}} = \frac{\sum_{N_M=1}^{N_M} \Delta\varphi_{\text{изм2}}^{\text{пр.п}} [N_M]}{\frac{N_M}{2}},$$

образовать разность приращений (вторые разности фаз) и поделить ее на временной сдвиг между серединами половинок мерного интервала, то есть на $T_M/2$. Это приводит к следующим алгоритмам оценки радионавигационных и навигационных параметров $\overline{\Omega}_D^{\text{пр.с}}$, $\overline{\Omega}_D^{\text{пр.п}}$, $\overline{\Delta R}_i^{\text{пр.с}}$, $\overline{\Delta R}_i^{\text{пр.п}}$, $\overline{R}_i^{\text{пр.с}}$, $\overline{R}_i^{\text{пр.п}}$, $\overline{\theta}_i^{\text{пр.с}}$, $\overline{\theta}_i^{\text{пр.п}}$, $\overline{V}_i^{\text{пр.с}}$, $\overline{V}_i^{\text{пр.п}}$, $\overline{d}_i^{\text{пр.с}}$, $\overline{d}_i^{\text{пр.п}}$. Первый раз измеряются в радиолиниях «радиомаяк – спутник» и второй раз в радиолиниях «спутник – пользователь» [3], [4].

$$\begin{aligned} \overline{\Omega}_D^{\text{пр.с}} &= \frac{2(\overline{\Delta\varphi}_{\text{изм2}}^{\text{пр.с}} - \overline{\Delta\varphi}_{\text{изм1}}^{\text{пр.с}})}{(t_{i+1} - t_i)}; \\ \overline{\Omega}_D^{\text{пр.п}} &= \frac{2(\overline{\Delta\varphi}_{\text{изм2}}^{\text{пр.п}} - \overline{\Delta\varphi}_{\text{изм1}}^{\text{пр.п}})}{(t_{i+1} - t_i)}; \\ \overline{\Delta R}_i^{\text{пр.с}} &= \frac{(\overline{\Delta\varphi}_{\text{изм2}}^{\text{пр.с}} - \overline{\Delta\varphi}_{\text{изм1}}^{\text{пр.с}}) c}{\pi f_i^{\text{пр.с}}}; \\ \overline{\Delta R}_i^{\text{пр.п}} &= \frac{(\overline{\Delta\varphi}_{\text{изм2}}^{\text{пр.п}} - \overline{\Delta\varphi}_{\text{изм1}}^{\text{пр.п}}) c}{\pi f_i^{\text{пр.п}}}; \\ \overline{R}_i^{\text{пр.с}} &= \frac{(\overline{\Delta\varphi}_{\text{изм2}}^{\text{пр.с}} - \overline{\Delta\varphi}_{\text{изм1}}^{\text{пр.с}}) c}{\pi f_i^{\text{пр.с}}(t_{i+1} - t_i)}; \\ \overline{R}_i^{\text{пр.п}} &= \frac{(\overline{\Delta\varphi}_{\text{изм2}}^{\text{пр.п}} - \overline{\Delta\varphi}_{\text{изм1}}^{\text{пр.п}}) c}{\pi f_i^{\text{пр.п}}(t_{i+1} - t_i)}; \\ \overline{\theta}_i^{\text{пр.с}} &= \arccos \frac{(\overline{\Delta\varphi}_{\text{изм2}}^{\text{пр.с}} - \overline{\Delta\varphi}_{\text{изм1}}^{\text{пр.с}}) c}{\pi f_i^{\text{пр.с}}(t_{i+1} - t_i) V_i^{\text{пр.с}}}; \\ \overline{\theta}_i^{\text{пр.п}} &= \arccos \frac{(\overline{\Delta\varphi}_{\text{изм2}}^{\text{пр.п}} - \overline{\Delta\varphi}_{\text{изм1}}^{\text{пр.п}}) c}{\pi f_i^{\text{пр.п}}(t_{i+1} - t_i) V_i^{\text{пр.п}}}; \\ \overline{V}_i^{\text{пр.с}} &= \frac{c}{f_{0i}} \sqrt{f_{0i}^2 - f_i^2 \text{пр.с} \left(1 + \frac{\dot{R}_i^{\text{пр.с}}}{c}\right)^2}; \\ \overline{V}_i^{\text{пр.п}} &= \frac{c}{f_{0i}} \sqrt{f_{0i}^2 - f_i^2 \text{пр.п} \left(1 + \frac{\dot{R}_i^{\text{пр.п}}}{c}\right)^2}; \end{aligned} \quad (2)$$

$$\overline{d}_i^{\text{пр.с}} = \frac{\frac{(\overline{\Delta\varphi}_{\text{изм2}}^{\text{пр.с}} - \overline{\Delta\varphi}_{\text{изм1}}^{\text{пр.с}}) c}{\pi f_i^{\text{пр.с}}}}{\cos \frac{(\overline{\Delta\varphi}_{\text{изм2}}^{\text{пр.с}} - \overline{\Delta\varphi}_{\text{изм1}}^{\text{пр.с}}) c}{\pi f_i^{\text{пр.с}}(t_{i+1} - t_i) V_i^{\text{пр.с}}}};$$

$$\overline{d}_i^{\text{пр.п}} = \frac{\frac{(\overline{\Delta\varphi}_{\text{изм2}}^{\text{пр.п}} - \overline{\Delta\varphi}_{\text{изм1}}^{\text{пр.п}}) c}{\pi f_i^{\text{пр.п}}}}{\cos \frac{(\overline{\Delta\varphi}_{\text{изм2}}^{\text{пр.п}} - \overline{\Delta\varphi}_{\text{изм1}}^{\text{пр.п}}) c}{\pi f_i^{\text{пр.п}}(t_{i+1} - t_i) V_i^{\text{пр.п}}}},$$

где $f_i^{\text{пр.с}}$ – частота колебаний радиосигнала, принимаемого аппаратурой ПУСР; $f_i^{\text{пр.п}}$ – частота колебаний радиосигнала, принимаемого аппаратурой пользователей; c – скорость света.

$$f_i^{\text{пр.с}} = f_{0i} \pm \Omega_{D_{\text{изм}}}^{\text{пр.с}};$$

$$f_i^{\text{пр.п}} = f_i \pm \Omega_{D_{\text{изм}}}^{\text{пр.п}},$$

где f_{0i} – частота колебаний радиосигналов, излучаемых радиомаяками; f_i – частота колебаний радиосигналов, ретранслируемых спутниками.

В соответствии с рис. 2, 3

$$\begin{aligned} V_i^{\text{пр.с}} \cdot \sin \theta_i^{\text{пр.с}} &= R_i^{\text{пр.с}} \cdot \dot{\theta}_i^{\text{пр.с}}; \\ V_i^{\text{пр.п}} \cdot \sin \theta_i^{\text{пр.п}} &= R_i^{\text{пр.п}} \cdot \dot{\theta}_i^{\text{пр.п}}. \end{aligned} \quad (3)$$

С другой стороны,

$$V_i^{\text{пр.с}} = \frac{\dot{R}_i^{\text{пр.с}}}{\cos \theta_i^{\text{пр.с}}}; \quad V_i^{\text{пр.п}} = \frac{\dot{R}_i^{\text{пр.п}}}{\cos \theta_i^{\text{пр.п}}}.$$

Следовательно,

$$R_i^{\text{пр.с}} = \left| \frac{\dot{R}_i^{\text{пр.с}} \cdot \sin \theta_i^{\text{пр.с}}}{\cos \theta_i^{\text{пр.с}} \cdot \dot{\theta}_i^{\text{пр.с}}} \right|; \quad R_i^{\text{пр.п}} = \left| \frac{\dot{R}_i^{\text{пр.п}} \cdot \sin \theta_i^{\text{пр.п}}}{\cos \theta_i^{\text{пр.п}} \cdot \dot{\theta}_i^{\text{пр.п}}} \right|.$$

Тогда дальности между фазовыми центрами антенн источников излучения радиосигналов и фазовыми центрами приемных антенн с учетом выражений (1) находятся как

$$\begin{aligned} R_i^{\text{пр.с}} &= \frac{\dot{R}_i^{\text{пр.с}} \sin \theta_i^{\text{пр.с}}}{\Delta \dot{R}_i^{\text{пр.с}}} d_i^{\text{пр.с}} \text{tg} \theta_i^{\text{пр.с}}; \\ R_i^{\text{пр.п}} &= \frac{\dot{R}_i^{\text{пр.п}} \sin \theta_i^{\text{пр.п}}}{\Delta \dot{R}_i^{\text{пр.п}}} d_i^{\text{пр.п}} \text{tg} \theta_i^{\text{пр.п}}, \end{aligned} \quad (4)$$

где значения $\Delta \dot{R}_i^{\text{np.c}}$, $\Delta \dot{R}_i^{\text{np.n}}$, $\dot{R}_i^{\text{np.c}}$, $\dot{R}_i^{\text{np.n}}$, $\theta_i^{\text{np.c}}$, $\theta_i^{\text{np.n}}$, $d_i^{\text{np.c}}$, $d_i^{\text{np.n}}$ определяются выражениями (2).

Для инженерной реализации предпочтительней использовать более точный алгоритм кинематического метода определения дальностей (расстояний) между «фазовыми центрами антенн НРМ – фазовыми центрами антенн спутников», «фазовыми центрами антенн спутников – фазовыми центрами антенн пользователей», при котором базовые расстояния $d_i^{\text{np.c}}$, $d_i^{\text{np.n}}$ не измеряются, не определяются и не используются.

Для этого угловые скорости $\theta_i^{\text{np.c}}$, $\theta_i^{\text{np.n}}$ фазовых центров спутниковых антенн с использованием фазовых измерений, обусловленных доплеровским сдвигом относительно направлений «фазовый центр антенн спутников – фазовый центр антенн НРМ», «фазовый центр антенн спутников – фазовый центр антенн пользователей» соответственно определяются из выражений

$$V_i^{\text{np.c}} = \frac{\dot{R}_i^{\text{np.c}}}{\cos \theta_i^{\text{np.c}}};$$

$$V_i^{\text{np.n}} = \frac{\dot{R}_i^{\text{np.n}}}{\cos \theta_i^{\text{np.n}}}.$$

После дифференцирования обеих частей равенств, считая, что тангенциальные скорости фазовых центров антенн спутников на мерных интервалах 1...10 секунд являются постоянными, выражения, определяющие численные значения угловой скорости, примут вид

$$\dot{\theta}_i^{\text{np.c}} = \frac{\ddot{R}_i^{\text{np.c}}}{\sin \theta_i^{\text{np.c}} \cdot V_i^{\text{np.c}}};$$

$$\dot{\theta}_i^{\text{np.n}} = \frac{\ddot{R}_i^{\text{np.n}}}{\sin \theta_i^{\text{np.n}} \cdot V_i^{\text{np.n}}}.$$

(5)

Тогда дальности между фазовыми центрами антенн источников излучения навигационных радиосигналов и фазовыми центрами приемных с учетом выражений 3 определяются из уравнений

$$R_i^{\text{np.c}} = \frac{(\dot{R}_i^{\text{np.c}})^2}{\ddot{R}_i^{\text{np.c}}} \cdot \text{tg} \theta_i^{\text{np.c}} \text{sc} \theta_i^{\text{np.c}};$$

$$R_i^{\text{np.n}} = \frac{(\dot{R}_i^{\text{np.n}})^2}{\ddot{R}_i^{\text{np.n}}} \cdot \text{tg} \theta_i^{\text{np.n}} \text{sc} \theta_i^{\text{np.n}},$$

где $\dot{R}_i^{\text{np.c}}$, $\dot{R}_i^{\text{np.n}}$ – производные скоростей изменения дальностей в серединах мерных интервалов.

Рассмотренные фазовые измерения (измерения приращений дальностей) с использованием дифференциальной радиально-скоростной методики являются реализацией режима относительных измерений, положительной особенностью которых является то, что на односекундных мерных интервалах погрешности измерений, обусловленных расхождением шкал времени и частот в радиолиниях «радиомаяки-спутники», «спутники-пользователи», влиянием ионосферы, тропосферы, гравитационным полем Земли, радиационным потоком, излучаемым Солнцем, силами притяжения Луны и Солнца, давлением солнечного света, магнитным и электрическим полями, а также влиянием на движение спутников лобового сопротивления, носят систематический характер. При применении вторичного усреднения фазовых измерений перечисленные погрешности практически устраняются.

В выражениях, определяющих значения дальностей между радиомаяком и спутником, между спутником и пользователем, отсутствуют погрешности, обусловленные отклонениями эталона времени i -го спутника, отклонениями эталона времени пользователя и отклонениями эталона времени наземного радиомаяка от единого времени GPS. Для определения дальностей измерение времени распространения электромагнитных волн не требуется. Следовательно, и нет в целом проблемы синхронизации навигационных радиосигналов.

Прямые измерения значений радионавигационных параметров и косвенные (определения), приведенные ниже, позволяют в свою очередь определить значение модуля радиус-вектора ($R_3 + H$) с применением теоремы косинусов. Из треугольников Ot^*M и Ot^*N (рис. 2, 3) имеем

$$(R_3 + H)_{\text{пр.с}}^2 - 2R_i^{\text{пр.с}} \cdot (R_3 + H)_{\text{пр.с}} \cdot \sin\theta_i^{\text{пр.с}} + (R_i^{\text{пр.с}})^2 - (R_3 + h_i)^2 = 0; \quad (6)$$

$$(R_3 + H)_{\text{пр.с}}^2 - 2R_i^{\text{пр.п}} \cdot (R_3 + H)_{\text{пр.с}} \cdot \sin\theta_i^{\text{пр.п}} + (R_i^{\text{пр.п}})^2 - (R_3 + h_{\text{П}})^2 = 0, \quad (7)$$

где $R_i^{\text{пр.с}}$, $R_i^{\text{пр.п}}$ – дальности между фазовым центром антенны наземного источника (радиомаяка) – фазовым центром антенны спутника и фазовым центром антенны спутника – фазовым центром антенны наземной пользовательской аппаратуры (ПА), соответственно, определяемые выражениями (4); $(R_3 + h_{\text{П}})$ – модуль местного геоцентрического радиус-вектора (вектора положения фазового центра антенны пользовательского терминала); $(R_3 + h_i)$ – модуль местного геоцентрического радиус-вектора (вектора положения фазового центра антенны радиомаяка);

$$(R_3 + h_1) = \sqrt{X_{M_1}^2 + Y_{M_1}^2 + Z_{M_1}^2};$$

$$(R_3 + h_2) = \sqrt{X_{M_2}^2 + Y_{M_2}^2 + Z_{M_2}^2};$$

$$(R_3 + h_3) = \sqrt{X_{M_3}^2 + Y_{M_3}^2 + Z_{M_3}^2};$$

$X_{M_1}, Y_{M_1}, Z_{M_1}, X_{M_2}, Y_{M_2}, Z_{M_2}, X_{M_3}, Y_{M_3}, Z_{M_3}$ – значения координат первого, второго и третьего опорных наземных радиомаяков соответственно.

$$(R_3 + H)_{\text{пр.с}} = R_i^{\text{пр.с}} \cdot \sin\theta_i^{\text{пр.с}} \pm \sqrt{(R_i^{\text{пр.с}} \cdot \sin\theta_i^{\text{пр.с}})^2 - (R_i^{\text{пр.с}})^2 + (R_3 + h_i)^2} \quad (8)$$

Подставляя значение $(R_3 + H)_{\text{пр.с}}$ в уравнение (6) определяют значение модуля местного геоцентрического радиус-вектора $(R_3 + h_{\text{П}})$ – модуля вектора положения фазового центра антенны наземной ПА.

$$(R_3 + h_{\text{П}}) = \pm \sqrt{(R_3 + H)_{\text{пр.с}}^2 - 2R_i^{\text{пр.п}}(R_3 + H)_{\text{пр.с}} \sin\theta_i^{\text{пр.п}} + (R_i^{\text{пр.п}})^2} \quad (9)$$

Модуль линейной мгновенной скорости V_i вращательного движения фазового центра антенны спутников на дальностях $(R_3 + H)$ от притягивающего центра (центра масс Земли) определяется выражением

$$V_i = \sqrt{\frac{\mu}{R_3 + H}} = \omega_c \cdot (R_3 + H),$$

где μ – геоцентрическая гравитационная постоянная; R_3 – радиус Земли; H – высота спутников (фазовых центров антенн) над поверхностью Земли; ω_c – угловая скорость фазового центра антенны спутника относительно центра масс Земли;

$$(R_3 + H)^{\text{пр.с}} = \frac{\mu}{(V_i^{\text{пр.с}})^2} = \frac{V_i^{\text{пр.с}}}{\omega_c}; \quad (10)$$

$$(R_3 + H)^{\text{пр.п}} = \frac{\mu}{(V_i^{\text{пр.п}})^2} = \frac{V_i^{\text{пр.п}}}{\omega_c}, \quad (11)$$

где значения $V_i^{\text{пр.с}}$, $V_i^{\text{пр.п}}$ определяются выражениями (2).

По измерениям, произведенным спутниковой и наземной ПА с использованием выражений (6)...(11), определяются мгновенные значения геоцентрической гравитационной постоянной $\mu^{\text{пр.с}}$, $\mu^{\text{пр.п}}$.

$$\mu^{\text{пр.с}} = (V_i^{\text{пр.с}})^2 \cdot R_i^{\text{пр.с}} \cdot \sin\theta_i^{\text{пр.с}} \pm \sqrt{(R_i^{\text{пр.с}} \cdot \sin\theta_i^{\text{пр.с}})^2 - (R_i^{\text{пр.с}})^2 + (R_3 + h_i)^2}; \quad (12)$$

$$\mu^{\text{пр.п}} = (V_i^{\text{пр.п}})^2 \cdot R_i^{\text{пр.п}} \cdot \sin\theta_i^{\text{пр.п}} \pm \sqrt{(R_i^{\text{пр.п}} \cdot \sin\theta_i^{\text{пр.п}})^2 - (R_i^{\text{пр.п}})^2 + (R_3 + h_{\text{П}})^2}.$$

Значения мгновенных геоцентрических гравитационных постоянных являются величинами, масштабирующими координатное пространство.

Предположение о том, что создаваемая геодезистами система координат незыблема во времени, перестает отвечать потребностям практики. Вертикальные движения земной коры искажают высотную основу наших нивелировок, а горизонтальные движения изменяют плановые координаты, определенные астрономо-геодезическими методами.

Движение полюсов, изменения скорости вращения Земли с течением времени меняют установившийся взгляд на основную задачу геодезии как статическую задачу. Поэтому рассмотренные прямые и косвенные измерения в настоящее время позволяют на-

чать исследование временных изменений значений геоцентрической гравитационной постоянной, фигуры, размеров и скорости вращения спутников Земли, чтобы на этой основе изучать поведение принятой системы координат и проводить ее к заданной эпохе.

Таким образом, высокоточные определения радионавигационных параметров по фазовым интерферометрическим измерениям в спутниковых радиоперелиниях с использованием несущих частот радиосигналов и дифференциальной радиально-скоростной методики измерений позволяют производить автономно, мгновенно решение навигационных и геодезических задач в геоцентрической системе координат, начало которой размещено в центре масс Земли.

Использование рассмотренного кинематического алгоритма измерения дальностей позволяет отказаться от измерений дальностей в спутниковых радионавигационных системах с помощью дальномерных кодовых псевдослучайных последовательностей, а следовательно отказаться от кодового разделения спутниковых навигационных радиоканалов, перейти на частотное и заменить спутниковые источники навигационных радиосигналов ретрансляторами, ретранслирующими, например, навигационные радиосигналы в одном диапазоне частот, а радиосигналы наземных маяков в другом.

Соответственно высвободившиеся участки частотного диапазона и использование алгоритмов кинематического метода измерения дальностей по фазе несущей позволяют реализовать идеологию системы связи «Глобалстар» для глобального предоставления услуг связи подвижным и стационарным пользователям-абонентам, услуг наблюдения и управления.

Заключение

Рассмотренные алгоритмы кинематического метода определения дальности обеспечивают эффективное использование невосполнимого мирового ресурса, каким является радиочастотный спектр, и позволяют решить проблему автономного функ-

ционирования спутниковых навигационных систем.

Высокая точность алгоритмов определения дальности достигается за счет применения спутниковой радиоинтерферометрии со сверхдлинной базой в режиме радиопеленгатора, когда прием радиосигнала наземного радиомаяка на мерном интервале осуществляется спутниковой приёмно-измерительной аппаратурой на одну антенну движущегося спутника, и в режиме фазового радиомаяка, когда прием ретранслированного спутником радиосигнала наземного радиомаяка на мерном интервале осуществляется наземной приёмно-измерительной аппаратурой также на одну антенну. Базовым расстоянием при этом является расстояние, которое пролетает фазовый центр спутниковой антенны за время равное мерному интервалу. При определении дальности между фазовыми центрами наземных антенн и фазовыми центрами спутниковых антенн время распространения электромагнитных волн непосредственно в явном виде не измеряется.

Литература

1. Казаринов Ю.М., Коломенский Ю.А. и др. Радиотехнические системы. – М.: Советское радио, 1968.
2. Цифровые радиоприёмные системы. Справочник под редакцией М.И. Жодзишского. – М.: Радио и связь, 1990.
3. Армизонов А.Н. Способ определения местоположения составляющих вектора скорости фазовых центров антенн спутниковых источников навигационных сигналов и фазовых центров антенн навигационной аппаратуры пользователей спутниковых радионавигационных систем. Патент № 2210788(МКП G01S 5/00, 2001,RU).
4. Армизонов А.Н. Способ автономного мгновенного определения пользователями-абонентами координат местоположения, составляющих вектора скорости, угловой ориентации в пространстве и пеленга по фазе несущей радиосигналов наземных радиомаяков, ретранслируемых спутниками. Патент № 2286584 (МКП G01S 5/14, 2004,RU).