

УДК 627.71

И.В. Буняева, В.В. Пискорж, В.О. Черановский

Национальный аэрокосмический университет имени Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков

ОПТИМИЗАЦИЯ ДАТЧИКА УГЛОВОЙ ОРИЕНТАЦИИ ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА

Методом максимального правдоподобия выполнен синтез оптимального алгоритма обработки сигналов навигационных спутников в датчике определения угловой ориентации ЛА. Оптимизация обработки сигналов позволила вдвое уменьшить рассеивание оценок параметров угловой ориентации по сравнению с типовыми алгоритмами обработки вторых разностей фаз навигационных сигналов.

Ключевые слова: параметры угловой ориентации, GPS, спутниковые системы глобального позиционирования.

Введение

Традиционно, системы управления летательного аппарата (ЛА) используют различные типы датчиков для определения положения и ориентации объекта в пространстве. Для получения информации о положении, скорости и времени используются приемники GPS, в то время как ориентация платформы определяется с помощью инерциальных датчиков. Инерциальные датчики формируют угловую информацию в высоком темпе и с приемлемой кратковременной стабильностью. Однако присущие им непредсказуемые медленные уходы показаний требуют периодической коррекции этих датчиков. Одним из удачных в этом плане решением является совместное использование данных инерциальных датчиков и приемников GPS, хорошо дополняющих друг друга.

Несмотря на то, что спутниковые системы глобального позиционирования (GPS, например) создавались для обеспечения потребителей, оснащенных соответствующей аппаратурой, информацией о их положении и времени, в последние 10 – 15 лет они используются для определения ориентации спутников, самолетов, кораблей и других платформ [1 – 3].

Принимая и обрабатывая сигналы от нескольких разнесенных в пространстве антенн, жестко связанных с платформой, система определения ее угловой ориентации по сигналам GPS с не зависящей от времени высокой точностью определяет ориентацию платформы в пространстве.

При определении параметров угловой ориентации объекта используется возможность высокоточного определения относительных координат элементов антенной решетки по данным подключенных к ним GPS приемников. Относительные координаты антенн находятся в топоцентрической системе координат. Вместе с тем, координаты фазовых центров этих антенн определены в системе отсчета, связанной с объектом. Сопоставление координат антенн в различных системах отсчета позволяет найти соответствующую матрицу разворота, элементы которой характеризуют параметры угловой ориентации объекта.

Для определения относительных координат элементов антенной решетки используются измерения соответствующих разностей фаз навигационных сигналов. Характерной особенностью фазовых измерений является их неоднозначность – разность хода сигналов соответствующего навигационного космического аппарата (НКА), принятых разнесенными антеннами, содержит (в метрической мере) кроме точно измеренной т.н. дольной фазы (интервал ее изменения – длина волны принимаемого колебания) еще и неизвестное число целых длин волн. Поэтому типовые алгоритмы обработки фазовых измерений в угломерных системах включают два последовательных этапа – этап разрешения неоднозначности фазовых измерений и этап формирования оценки параметров угловой ориентации. Вместе с тем, как показано ниже, весьма затратная с точки зрения вычислительных и временных ресурсов процедура разрешения неоднозначности фазовых измерений не вытекает из условий задачи. Более того, выполненный ниже синтез алгоритма оптимальной обработки навигационных сигналов при определении параметров угловой ориентации платформы, приводит к решениям, отличающимся от типовых еще вдвое лучшей точностью измерений.

Формулировка задачи определения параметров угловой ориентации объекта по сигналам GPS

На ЛА размещены три приемных антенны GPS – основная антенна и две вынесенных. Все три антенны ориентированы одинаково, так, чтобы их диаграммы направленности обеспечивали прием сигналов навигационных спутников из верхней полусферы. Эти антенны образуют две базы так, что соединяющие их фазовые центры вектора неколлинеарны. К антеннам подключены приемники GPS, принимающие сигналы одних и тех же навигационных спутников. Помимо результатов навигационных определений эти приёмники формируют и передают для последующей обработки т.н. «сырые данные» –

оценки параметров всех принимаемых навигационных сигналов: задержки, доплеровского сдвига и начальной фазы, а также эфемериды НКА, привлекаемых к измерениям. Основная антенна размещена в начале связанной с ЛА системой координат (в начале ССК), а вынесенные – в точках с координатами $r=r_1$ и $r=r_2$. Требуется по наблюдению навигационных сигналов на выходах антенн определить ориентацию ССК относительно топоцентрической или нормальной (в терминах [4]) системы координат (ТПСК).

Начало ТПСК удобно совместить с фазовым центром основной (центральной) антенны антенной решетки системы определения угловой ориентации. Ось U направлена вверх вдоль нормали к земному эллипсоиду. Оси E и N направлены на восток и север соответственно в плоскости, касательной к эллипсоиду (система отсчета восток-север-вверх (East-North-Up)). Ортогональная ССК жестко связана с ЛА так, что ось X_{ec} направлена вдоль продольной оси ЛА, ось Z – в направлении правого борта, а ось Y – вверх. Начала ТПСК и ССК совпадают друг с другом и фазовым центром основной антенны антенной решетки. Координаты остальных антенн антенной решетки должны быть точно определены в ССК в процессе изготовления системы.

Угловая ориентация ЛА характеризуется [4] углом курса Ψ_c – угол между направлением на север и проекцией продольной оси X на горизонтальную плоскость, углом тангажа θ_c – угол между продольной осью X и горизонтальной плоскостью и углом крена φ_c – угол поперечной осью ZССК и горизонтальной плоскостью.

Модель сигналов и помех

На выходе k-го канала обработки GPS приемника, подключенного к i-й антенне ($k = \overline{1, M}$, $i = 0, 1, 2$) в некоторый момент времени t_n формируются комплексные отсчеты $\dot{u}_{ik}(t_n)$, представляющие собой сумму полезных сигналов $\dot{s}_{ik}(\bar{\chi}_c, \varphi_{ci}, \alpha_{ck})$ и помех \dot{n}_{ik} .

Здесь $\bar{\chi}_c = (\psi_c, \theta_c, \varphi_c) \in \Omega$ – вектор оцениваемых параметров угловой ориентации ССК относительно ТПСК; φ_{ci} – начальная фаза гетеродина i-го приемника ($\varphi_{c0} = 0$); α_{ck} – начальная фаза сигнала k-го навигационного космического аппарата (НКА). Начальные фазы гетеродинов и навигационных сигналов являются неинформационными, несущественными параметрами. Помехи \dot{n}_{ik} являются отсчетами комплексных нормальных процессов с нулевым средним и дисперсией $\sigma_n^2 \sigma_n^{\#}$. Область определения Ω параметров угловой ориентации описывается системой следующих неравенств [4]:

$$\text{Re} e_t^{**} = q_w dx [\mu^* (i_w^* - i_w) (\frac{1}{\pi} \beta + 1)]^{-1}. \quad (1)$$

При сравнительно небольших размерах баз, когда падающий на антенную решетку фронт волны допустимо считать плоским, выражение для комплексных огибающих сигналов, выделяемых на i-й антенне каналом обработки, настроенным на прием сигналов k-го НКА имеет следующий вид:

$$\dot{s}_{ik}(\bar{\chi}_c, \varphi_{ci}, \alpha_{ck}) = s_k \exp \left\{ -j \left[\frac{2\pi}{\lambda} \gamma_k R(\bar{\chi}_c) r_i + \varphi_{ci} + \alpha_{ck} \right] \right\}; \quad (2)$$

$$\dot{u}_{ik} = \dot{s}_{ik}(\bar{\chi}_c, \varphi_{ci}, \alpha_{ck}) + \dot{n}_{ik}, \quad i = 0, 1, 2; k = \overline{1, M}; \quad (3)$$

$$\langle \dot{n}_{ik} \dot{n}_{in}^* \rangle = \delta_{il} \delta_{kn} 2\delta_n^2. \quad (4)$$

В (2) S_k – амплитуда сигнала k-го НКА; γ_k – единичный вектор, характеризующий направление на k-й НКА в ТПСК; M – число НКА, привлекаемых к измерениям ориентации БПЛА. r_i – координата i-й антенны ($r_0 = 0$), λ – длина волны навигационного сигнала, а δ_{il} – символ Кронекера:

$$\delta_{ii} = \begin{cases} 1, & \text{при } i=L, \\ 0, & \text{при } i \neq L, \end{cases}$$

$R^T(\bar{\chi}_c)$ – матрица поворота, используемая для пересчета координат точки в ССК в соответствующие координаты в ТПСК [4], определяется соотношением:

$$R^T(\psi, \theta, \phi) = \begin{bmatrix} \cos\psi \cdot \cos\theta & \sin\psi \cdot \sin\theta - & \sin\psi \cdot \cos\theta + \\ & \cos\psi \cdot \sin\theta \cdot \cos\phi & \cos\psi \cdot \sin\theta \cdot \sin\phi \\ \sin\theta & \cos\phi \cdot \cos\theta & -\cos\theta \cdot \sin\phi \\ -\sin\psi \cdot \cos\theta & \cos\psi \cdot \sin\theta + & \cos\psi \cdot \cos\theta - \\ & \sin\psi \cdot \sin\theta \cdot \cos\phi & \sin\psi \cdot \sin\theta \cdot \sin\phi \end{bmatrix}. \quad (5)$$

Требуется по наблюдению (3) сформировать наилучшую оценку информационных параметров $\bar{\chi}_c$ угловой ориентации ССК по отношению к ТПСК.

Вывод алгоритма оценки параметров угловой ориентации

Для принятой модели сигналов и помех наилучшая оценка информационных параметров определяется по максимуму функции правдоподобия. Запишем выражение для условной плотности распределения реализации

$$\bar{u} = (\dot{u}_{ik}; i = \overline{0, 2}; k = \overline{1, M})$$

при условии, что фигурирующие в (3) параметры навигационных сигналов имеют фиксированное значение.

$$p(\bar{u} / \bar{\chi}; \bar{\alpha}; \bar{\varphi}) = K \exp \left(-2\sigma_n^{-2} \sum_{k=1}^M \sum_{i=0}^2 \times \left\| \dot{u}_{ik} - S_k \exp \left\{ j \left[\frac{2\pi}{\lambda} \gamma_k R^T(\bar{\chi}) r_i + \varphi_i + \alpha_k \right] \right\} \right\|^2 \right), \quad (6)$$

где $\bar{\alpha} = (\alpha_1, \dots, \alpha_M)$, $\bar{\varphi} = (0, \varphi_1, \varphi_2)$; k – несущественный для дальнейшего нормирующий множитель.

При фиксированной реализации \bar{u} данная плотность распределения вероятностей является функцией правдоподобия информационных $\bar{\chi}$ и неинформационных $(\bar{\alpha}; \bar{\varphi})$ параметров. Общая методика формирования оптимальной оценки информационных параметров и соответствующего алгоритма обработки принимаемых данных состоит [5] в усреднении плотности (6) по неинформационным (несущественным) параметрам и максимизации ее по информационным параметрам, либо в совместном оценивании всей совокупности параметров по максимуму функции правдоподобия (6). Оба подхода приводят, обычно, к одним и тем же результатам.

Опуская промежуточные выкладки, приведем конечное выражение для функции правдоподобия параметра $\bar{\chi}$:

$$p(\bar{u} / \bar{\chi}; \bar{\alpha}; \bar{\varphi}) = K_1 \exp\left(\sigma_n^{-2} \sum_{k=1}^M |\dot{y}_k(\bar{\chi})|\right) = K_1 \exp\left(\sigma_n^{-2} Z(\bar{\chi})\right). \quad (7)$$

Очевидно, что координата максимума функции правдоподобия $p(\bar{u} / \bar{\chi})$ совпадает с координатой максимума функции $Z(\bar{\chi})$ в силу монотонности экспоненты. Здесь $Z(\bar{\chi})$ – достаточная статистика, равная

$$Z(\bar{\chi}) = \sum_{k=1}^M |\dot{y}_k(\bar{\chi})|. \quad (8)$$

В (8) опущены не влияющие на положение максимума достаточной статистики $Z(\bar{\chi})$ константы, а символом $\dot{y}_k(\bar{\chi})$ обозначен результат когерентной обработки принимаемых сигналов

$$\dot{y}_k(\bar{\chi}) = \sum_{i=0}^2 \exp\left\{j \left[\delta \Delta \vartheta_{ik} + \frac{2\pi}{\lambda} \delta \gamma_k R^T(\bar{\chi}) \Gamma_i \right]\right\}, \quad (9)$$

$$k = (\overline{1, M}).$$

В последнем соотношении символами $\delta \Delta \vartheta_{ik}$ и $\delta \gamma_k$ обозначены соответствующие разности:

$$\delta \Delta \vartheta_{ik} = \Delta \vartheta_{ik} - \Delta \vartheta_i; \quad (10)$$

$$\delta \gamma_k = \gamma_k - \tilde{\gamma}. \quad (11)$$

Здесь символами $\Delta \vartheta_i$ и $\tilde{\gamma}$ обозначены средние значения первых разностей фаз навигационных сигналов и направляющих косинусов НКА, привлекаемых к измерениям. Тогда

$$\hat{\varphi}_i(\bar{\chi}) = -\Delta \tilde{\vartheta}_i - \frac{2\pi}{\lambda} \tilde{\gamma} R^T(\bar{\chi}) \Gamma_i, i = 1, 2; \quad (12)$$

$$\Delta \tilde{\vartheta}_i = \frac{1}{M} \sum_{k=1}^M [\Delta \vartheta_{ik}]_{\text{mod } 2\pi}; \quad (13)$$

$$\tilde{\gamma} = \frac{1}{M} \sum_{k=1}^M \gamma_k. \quad (14)$$

Физическим содержанием оптимальной обработки (8) данных приёмников GPS является на пер-

вом этапе – когерентная фокусировка антенной решетки на k -й НКА для всех возможных значений параметров $\bar{\chi} \in \Omega$ ее ориентации (формирование функции $\dot{y}_k(\bar{\chi})$ в соответствии с (9)). Содержанием второго этапа является некогерентное накопление результатов первого этапа (формирование функции $Z(\bar{\chi})$ в соответствии с (8)). На практике функция $Z(\bar{\chi}) = Z(\psi, \theta, \varphi)$ формируется для дискретного множества значений аргументов $(\psi_p, \theta_r, \varphi_q) \in \Omega$.

При этом $\psi_p = p\Delta$; $\theta_r = r\Delta$; $\varphi_q = q\Delta$, где шаг дискретизации Δ определяется максимальным расстоянием между антеннами L так, что в градусной мере

$$\Delta(^{\circ}) = \frac{\lambda}{(5 \div 10)L} \frac{180}{\pi}. \quad (15)$$

При достаточно «густой» дискретизации, определяемой соотношением (15) можно использовать следующие простые соотношения для финальных оценок $(\hat{\psi}, \hat{\theta}, \hat{\varphi})$ параметров угловой ориентации:

$$\begin{aligned} \hat{\psi} &= p_m \Delta + \frac{\Delta}{2} \times (Z(p_m - 1, r_m, q_m) - \\ &\quad - Z(p_m + 1, r_m, q_m)) / (Z(p_m - 1, r_m, q_m) - \\ &\quad - 2Z(p_m, r_m, q_m) + Z(p_m + 1, r_m, q_m)); \\ \hat{\theta} &= r_m \Delta + \frac{\Delta}{2} \times (Z(p_m, r_m - 1, q_m) - \\ &\quad - Z(p_m, r_m + 1, q_m)) / (Z(p_m, r_m - 1, q_m) - \\ &\quad - 2Z(p_m, r_m, q_m) + Z(p_m, r_m + 1, q_m)); \\ \hat{\varphi} &= q_m \Delta + \frac{\Delta}{2} \times (Z(p_m, r_m, q_m - 1) - \\ &\quad - Z(p_m, r_m, q_m + 1)) / (Z(p_m, r_m, q_m - 1) - \\ &\quad - 2Z(p_m, r_m, q_m) + Z(p_m, r_m, q_m + 1)). \end{aligned} \quad (16)$$

Координаты максимума $Z(\bar{\chi})$ определяется в два этапа – вначале находится узел (p_m, r_m, q_m) сетки дискретизации, соответствующий максимальному отсчету $Z(p_m, r_m, q_m) = Z(p_m \Delta, r_m \Delta, q_m \Delta)$. Далее с использованием интерполяционной процедуры координаты максимума уточняется. При этом используется тот факт, что в окрестности максимума функция $Z(\bar{\chi})$ хорошо аппроксимируется поверхностью второго порядка. Отметим, что обычно фазы φ_i гетеродинов приемников исключаются путем формирования т.н. вторых разностей фаз навигационных сигналов. При этом вместо полученной выше оптимальной статистики (10) используется квазиоптимальная разность (вторая разность) [3]:

$$\delta \Delta \vartheta_{ik} = \Delta \vartheta_{ik} - \Delta \vartheta_{im}. \quad (17)$$

Здесь m – номер спутника с максимальным возвышением. Соответственно и вместо разности направляющих косинусов (11) используется разность

$$\delta \gamma_k = \gamma_k - \gamma_m. \quad (18)$$

Последующая обработка сохраняется такой же, как и в оптимальном алгоритме, т.е. в соответствии с соотношениями (9), (8) и (16).

Очевидно, что квазиоптимальный алгоритм существенно уступает в точности оптимальному. В самом деле, дисперсия второй разности (17) равна $4\sigma_{\xi}^2$, вместо $2(1+1/M)\sigma_{\xi}^2$ для разности (10) из оптимального алгоритма. Здесь σ_{ξ}^2 – дисперсия фаз навигационных сигналов. Соответственно и рассеивание квазиоптимальных оценок параметров угловой ориентации будет практически вдвое превышать рассеивание оптимальных.

Вопросы практической реализации алгоритма оценивания параметров угловой ориентации и его тестирование

Отметим, что при внешней простоте предлагаемый алгоритм требует выполнения большого объема однотипных вычислений. В частности, при длине базы порядка одного метра шаг дискретизации выходного эффекта составляет на основании (15) 1-2 градуса. При этом для перекрытия всей области неопределенности Ω необходимо сформировать $(0,2 \div 2) \cdot 10^7$ отсчетов.

Практическим выходом является использование информации от других датчиков для уменьшения априорной неопределенности по угловой ориентации. При отсутствии соответствующих датчиков, грубо, с погрешностью 5 – 7 градусов ориентация БПЛА может быть определена по данным GPS приемника, подключенного к центральной антенне. При этом с точность до значений углов атаки и скольжения тангаж и курс ЛА могут быть определены по направлению вектора скорости ЛА в ТПСК. А крен – по величине бокового ускорения, обусловленного изменением направления вектора подъемной силы ЛА. Наличие таких данных позволяет на несколько порядков уменьшить объем вычислений.

Часть вычислений в (8), (9) можно выполнить заранее за счет чего уменьшить количество вычислительных операций, выполняемых в реальном времени. Например, для каждого узла трехмерной сетки (15) можно заранее рассчитать значения векторов $v_i(\psi_p, \theta_r, \varphi_q) = R^T(\psi_p, \theta_r, \varphi_q) \cdot r_i / \lambda$, $i = 1, 2$ (по два вектора 3×1) и хранить их в памяти вычислителя. При этом формула (9) примет следующий вид:

$$\dot{y}_i(\psi_p, \theta_r, \varphi_q) = \sum_{i=0}^2 \exp \left\{ j \left[\delta \Delta \vartheta_{ik} + 2\pi \delta \gamma_k v_i(\psi_p, \theta_r, \varphi_q) \right] \right\}. \quad (19)$$

Тестирование полученного выше алгоритма определения параметров угловой ориентации проводилось на соответствующей экспериментальной

установке. В ее состав входили антенное устройство из трех антенн AV 33 фирмы Trimble, размещенных в вершинах равностороннего треугольника со стороной 0,71 м и присоединенных к ним трехприемников GPSAsteRx-m фирмы SeptentrioSatelliteNavigation. «Сырые» данные с выходов приемников через согласующее устройство поступают для регистрации и обработки в персональный компьютер. Алгоритм обработки реализован в среде Matlab. Ниже представлены результаты статического теста, полученные при обработке сигналов восьми навигационных спутников. На рис. 1 представлено сечение выходного эффекта (функции трех переменных) $Z(\bar{\chi}) = Z(\varphi, \theta, \varphi)$ для значения курсового угла ψ , равному истинному значению.

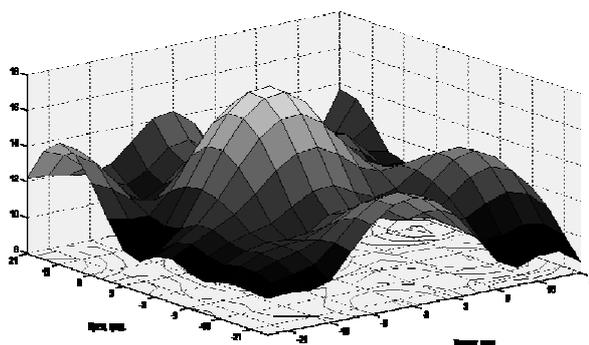


Рис. 1. Сечение выходного эффекта измерителя при истинном значении курсового угла

На рис. 2 представлено сечение выходного эффекта для значения угла крена, равному истинному значению.

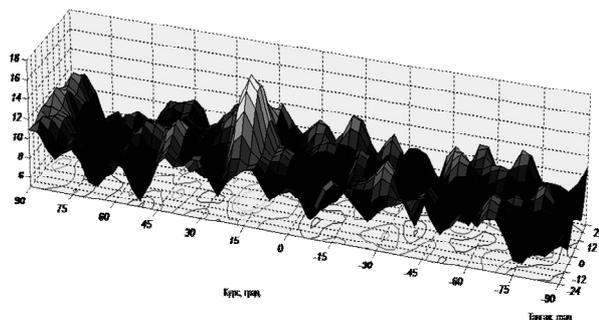


Рис. 2. Сечение выходного эффекта измерителя при истинном значении крена

Видно, что главный максимум выходного эффекта надежно локализуется на фоне сравнительно больших боковых лепестков. При этом для типовых отношений сигнал/шум вероятность аномальных (превышающих ширину главного лепестка функции $Z(\bar{\chi})$ погрешностей достаточно мала. Что касается хода нормальных ошибок измерений курса, крена и тангажа, то соответствующие графики представлены на рис. 3.

Среднеквадратические значения погрешностей измерений лежат в пределах 0,1 – 0,2 градуса.

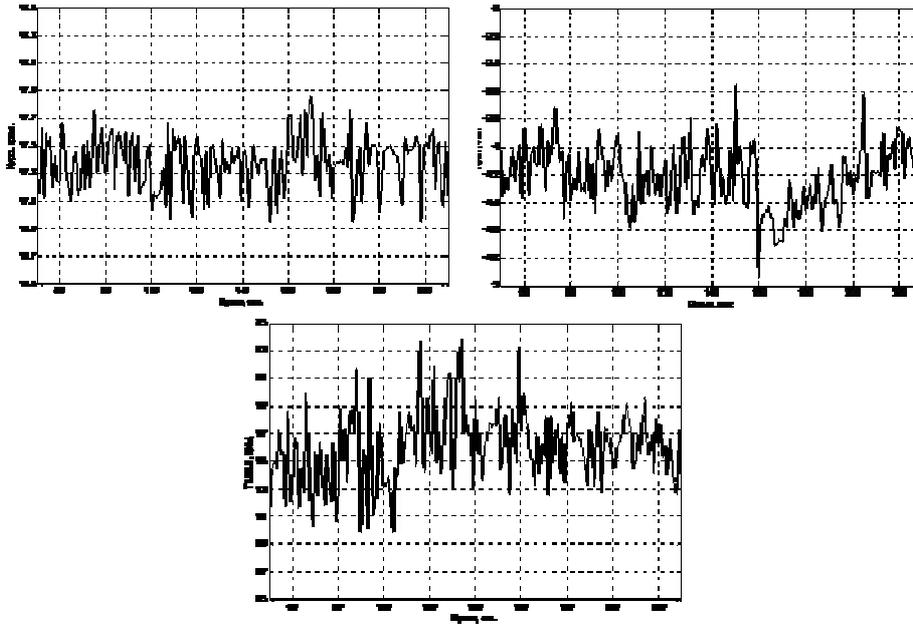


Рис. 3. Результати вимірювання параметрів куткової орієнтації

Заключення

В статтю отримано оптимальний алгоритм визначення параметрів куткової орієнтації літального апарату за сигналами супутникових навігаційних систем.

Алгоритм орієнтований на його реалізацію за допомогою недорогих приймачів GPS, «сирі» дані (фази навігаційних сигналів, ефемериди навігаційних супутників і деяка інша інформація) з яких отримують спеціалізований процесор.

Оптимізація обробки сигналів дозволила вдвічі зменшити розсіювання оцінок параметрів куткової орієнтації порівняно з типовими алгоритмами обробки вторих різниць фаз навігаційних сигналів.

Список литературы

1. Сератинас Б.Б. Глобальные системы позиционирования [Текст]: монография / Б.Б. Сератинас. – М.: ИКФ Каталог, 2002. – 106 с.

2. Cohen C.E. Global Positioning System: Theory and Application [Text] / C.E. Cohen // Sensors. – 1996. – Т. 163. – С. 519-538.

3. Lu G. Development of a GPS Multi-Antenna System for Attitude Determination, [Text] / G. Lu. – Department of Geomatics Engineering, University of Calgary, Alberta, Canada, 1994. – Ph.D. thesis, UCGE Reports, Number 20073.

4. ГОСТ 20058-80. Динамика летательных аппаратов в атмосфере. Термины, определения и обозначения. [Текст]. – М.: Государственный комитет СССР по стандартизации, 1980. – 55 с.

5. Фалькович С.Е. Статистическая теория измерительных радиосистем [Текст] / С.Е. Фалькович, Э.Н. Хомяков. – М.: Радио и связь, 1981. – 288 с.

Поступила в редколлегию 22.12.2015

Рецензент: д-р техн. наук, проф. В.В. Павликов, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков

ОПТИМІЗАЦІЯ ДАТЧИКА КУТОВОЇ ОРІЄНТАЦІЇ ЛІТАЛЬНОГО АПАРАТА

І.В. Буняєва, В.В. Піскорж, В.О. Черановський

Виконано синтез оптимального алгоритму обробки сигналів навігаційних супутників в задачі визначення параметрів куткової орієнтації ЛА. Оптимізація обробки сигналів вдвічі зменшує розсіювання оцінок параметрів куткової орієнтації в порівнянні з типовими алгоритмами обробки другої різниці фаз навігаційних сигналів.

Ключові слова: параметри куткової орієнтації, GPS, супутникові системи глобального позиціонування.

OPTIMIZATION OF THE ANGULAR ORIENTATION SENSOR FOR THE AIR VEHICLE

I.V. Bunyaeva, V.V. Piskorz, V.O. Cheranovskiy

Navigation satellites signals optimal algorithm synthesis in problem of platform attitude determinations accomplished. Optimization of signals processing halves the attitude estimates dispersion in comparison with typical algorithms of double-differenced carrier phase of navigation signals processing.

Keywords: angular orientation parameters, GPS, Global Positioning System satellite.