

УДК 629.7.051

КОМПЛЕКСНАЯ ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ ГЛОБАЛЬНОЙ НАВИГАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ И МОДУЛЕЙ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ 5G В ЦЕЛЯХ НАВИГАЦИОННОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПОЛЕТОВ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ В УСЛОВИЯХ МАССОВОЙ ЗАСТРОЙКИ СОВРЕМЕННЫХ МЕГАПОЛИСОВ

© 2024 г. Э. А. Болелов*, А. Т. Кудинов, Н. М. Романенко

*Московский государственный технический университет гражданской авиации,
Кронштадтский бульвар, 20, Москва, 125993 Российская Федерация*

**E-mail: edbolelov@mail.ru*

Поступила в редакцию 21.04.2024 г.

После доработки 21.04.2024 г.

Принята к публикации 25.04.2024 г.

Рассмотрен подход к построению бортовой аппаратуры потребителя глобальных навигационных спутниковых систем в составе бортового оборудования беспилотных летательных аппаратов (БПЛА). Выполнен анализ особенностей навигационного обеспечения БПЛА в процессе реализации различных сценариев их применения. Методами марковской теории оптимального оценивания случайных процессов получены алгоритмы комплексной обработки сигналов спутниковой радионавигационной системы и модуля позиционирования 5G для случая структурно отдельной обработки радиосигналов. Представлена структурная схема системы, характерной особенностью которой является отсутствие перекрестных связей между каналами обработки радиосигналов.

Ключевые слова: глобальные навигационные спутниковые системы, комплексная обработка информации, марковская теория оценивания случайных процессов, меандровые шумоподобные сигналы, ГЛОНАСС, BeiDou, беспилотные летательные аппараты, модуль позиционирования 5G

DOI: 10.31857/S0033849424080088, EDN: NODVKK

ВВЕДЕНИЕ

Как отмечается в «Концепции интеграции беспилотных воздушных судов в единое воздушное пространство Российской Федерации», «развитие сегмента беспилотной авиации, основанное на передовых технических решениях в области навигации, связи и телекоммуникации, открывает новые возможности для решения задач как в сфере обороны и безопасности государства, так и в сфере транспорта». Основой навигационного поля для обеспечения полетов беспилотных воздушных судов в Российской Федерации будет являться глобальная навигационная спутниковая система (ГНСС), включающая спутниковые созвездия ГЛОНАСС и GPS, а в перспективе также Galileo и BeiDou с функциональным дополнением спутникового базирования (в частности, российской системой дифференциальной коррекции и мониторинга), сертифицированным в соответствии с требованиями стандартов и рекомендуемой практики Международной организации гражданской авиации, а в районах аэродромов и вертодромов, возможно, будут использоваться локальные

контрольно-корректирующие станции (ККС), являющиеся функциональным дополнением наземного базирования.

Анализ мониторинга числа видимых на территории Российской Федерации навигационных космических аппаратов (НКА) и значений геометрического фактора, определяющего характеристики точности, различных ГНСС (ГЛОНАСС, GPS, Галилео, BeiDou) показывает, что наиболее перспективным направлением формирования навигационного поля представляется ГНСС, включающая спутниковые созвездия ГЛОНАСС и BeiDou (BDS). В частности, количество навигационных спутников составляет в среднем 23, а значение геометрического фактора PDOP в среднем не превышает 1.06. В то время как для GPS эти показатели составляют 10 видимых спутников, а значение геометрического фактора достигает 1.56 и выше [1].

Кроме того, факт, что в ГНСС BeiDou изначально используются ВОС-сигналы, относящиеся к классу меандровых шумоподобных (широкополосных) сигналов (МШПС), а в ГНСС ГЛОНАСС наряду с ВОС-сигналами применяются

традиционные шумоподобные сигналы (ШПС), позволяет предположить, что использование этих сигналов в системе обработки информации в составе навигационного оборудования беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) повысит эффективность навигационных определений на различных этапах полета. Особенности МШПС, выделяющие их из традиционных ШПС, достаточно подробно рассмотрены в монографии М. С. Ярлыкова «Меандровые шумоподобные сигналы (ВОС-сигналы) в новых спутниковых радионавигационных системах» [2].

При этом остается нерешенным комплекс задач, связанный с управлением воздушным движением беспилотного транспорта, включая задачи навигационного обеспечения, и контролем воздушного пространства в районах массовой застройки современных мегаполисов.

1. ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА НАВИГАЦИОННОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ БПЛА В УСЛОВИЯХ СОВРЕМЕННЫХ МЕГАПОЛИСОВ

В последнее время проведение наземных точечных и маршрутных исследований дополняется работами, связанными с запуском БПЛА. Данные съемки с помощью БПЛА в настоящее время рассматриваются как более дешевая и оперативная альтернатива использованию спутниковых данных. Промежуточное положение между наземной и аэрокосмической съемкой в целях локального мониторинга территорий по критерию «эффективность—стоимость» занимает съемка на базе дистанционно-управляемого БПЛА, обеспечивающего проведение работ на малых высотах и существенно более экономичного по сравнению с традиционными носителями. БПЛА способствуют наибольшему уровню детализации изучаемой поверхности и, в первую очередь, эффективны для применения в труднодоступных районах и для обзорных рекогносцировочных работ. Обычно геопривязка снимков к местности проводится методом синхронизации съемки с GPS-системой БПЛА. Для эффективной автоматизации анализа геоинформационных данных, в том числе для получения изображений с высоким разрешением для построения точных трехмерных моделей земной поверхности и объектов, необходимо точное позиционирование БПЛА. При посадке БПЛА на этапе сближения к точности позиционирования БПЛА предъявляются повышенные требования.

Средой являются, как правило, протяженные территории снаружи помещений, в том числе в условиях городской застройки. При обработке получаемых с БПЛА изображений в режиме «вне сети» крайне низкая задержка не требуется; в процессе посадки БПЛА, если изображения

с географической привязкой используются при так называемом сближении, задержка передачи данных о местоположении должна быть соразмерна скорости БПЛА для обеспечения возможности осуществления дистанционно управляемой посадки.

Для реализации данного сценария предъявляются следующие требования при скорости полета БПЛА примерно 150 км/ч: горизонтальная и вертикальная точность позиционирования примерно 0.1 м с доступностью 99%, точность оценки скорости не более 0.5 м/с по горизонтали и по вертикали, точность оценки угла/направления не более 2°, TTFF не более 10 с [3].

Для удаленного управления при полете на небольшой высоте в районах массовой застройки современных мегаполисов БПЛА должен быть оборудован модулем позиционирования 5G и поддерживать непрерывный сеанс связи/позиционирования средствами сети 5G со следующими характеристиками: задержка RTT не более 150 мс; ввиду возможных критических последствий надежность должна быть на уровне требований служб управления воздушным движением АТС (Air Traffic Control), близкой к 100%. Для реализации данного сценария при полете БПЛА по маршруту со скоростью до 50 км/ч и зависании над местом наблюдения снаружи помещений без существенных препятствий предъявляются следующие требования: точность горизонтального позиционирования должна быть не более 0.5 м, вертикальная точность не более 0.3 см, доступность 99%. При посадке и взлете БПЛА предъявляются требования: точность горизонтального позиционирования должна быть не более 0.5 м, вертикальная точность не более 0.1 м, доступность 99.9% на площади порядка 10 м² [3].

Таким образом, источниками навигационной информации на борту БПЛА на различных этапах полета и в ходе реализации различных сценариев применения, помимо ряда других, имеющихся в составе бортового оборудования, могут являться приемники сигналов ГНСС и модули позиционирования 5G. При этом, в зависимости от условий применения и особенностей решаемой задачи, основным источником будет являться один из отмеченных. Второй источник в этом случае может обеспечить поддержание на заданном уровне требуемых характеристик навигационных характеристик в случаях внезапного изменения текущих условий. В случае нарушения целостности поля ГНСС навигация будет обеспечиваться наземными радиотехническими средствами и альтернативными бортовыми навигационными устройствами (в рассматриваемом случае — модулями позиционирования 5G).

Применимость таких систем должна оцениваться с учетом достижения требуемой целостности и точности навигационных определений. Должна быть предусмотрена система мониторинга

навигационной инфраструктуры, предоставляющая информацию о ее состоянии. Участники воздушного движения должны быть информированы о состоянии навигационной инфраструктуры. Система должна выдавать предупреждения о текущем или прогнозируемом изменении точности навигации.

Устойчивость функционирования ГНСС в аномальных условиях в районах массовой застройки современных мегаполисов существенно зависит от помехоустойчивости приемников потребителей.

Помехоустойчивые приемники ГНСС могут быть построены на основе их комплексирования с другими измерителями и реализации методов первичной оптимальной (субоптимальной) обработки радиосигналов.

2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ СИНТЕЗА

Синтез алгоритмов КОИ при решении задач навигационного обеспечения БПЛА проведем с учетом того, что в зоне видимости БПЛА находится избыточное НКА. Кроме того, будем полагать, что выполнены следующие предположения:

1) для повышения качества функционирования в системе КОИ используется информация о координатах БПЛА, поступающая от модуля позиционирования 5G;

2) предусматривается возможность реализации автономного контроля целостности (АКЦ);

3) причиной нарушения целостности ГНСС является пропадание по какой-либо причине радиосигналов от того или иного НКА или от нескольких НКА одновременно;

4) определение координат БПЛА осуществляется в гринвичской системе координат (СК).

Вектор наблюдения на полуинтервалах $[t_k, t_{k+1})$ можно представить в виде

$$\Xi(t) = [\xi_1(t), \dots, \xi_I(t), \Xi(t_k)]^T, t \in [t_k, t_{k+1}), k = 1, 2, \dots, (1)$$

где

$$\xi_i(t) = S_i[t, \mathbf{Y}_i, \vartheta_{ik}, \lambda_{ik}] + n_i(t), i = \overline{1, I}, (2)$$

– радиосигнал i -го НКА, наблюдаемый на входе приемника ГНСС на полуинтервале $[t_k, t_{k+1})$; I – общее число НКА, доступных для наблюдения на борту БПЛА в текущий момент времени t ; $S_i[t, \mathbf{Y}_i, \vartheta_{ik}, \lambda_{ik}]$ – полезный дискретно-непрерывный сигнал i -го НКА; $n_i(t)$ – стационарный белый гауссовский шум (БГШ) наблюдения с известными статистическими характеристиками; $\mathbf{Y}_i^T(t) = [d_i, \dot{d}_i, \varphi_i, \Delta\omega_i]$ – вектор радионавигационных параметров, от которых непосредственно зависит радиосигнал i -го НКА (d_i – основной радионавигационный параметр, представляющий собой

псевдодальность по направлению БПЛА–НКА, \dot{d}_i – радиальная псевдоскорость применительно к i -му НКА, φ_i – случайная фаза, $\Delta\omega_i$ – уход частоты задающего генератора i -го НКА); ϑ_{ik} – дискретный информационный параметр, передающий служебную информацию и принимающий значения 0 и 1; λ_{ik} – параметр отказа для i -го НКА, принимающий значение 0 или 1 в зависимости от состояния i -го канала измерения («0» означает отказ канала, «1» – i -й канал исправен); T – знак транспонирования;

$$\Xi(t_k) = \mathbf{H}(t_k)\mathbf{X}(t_k) + \mathbf{E}_n(t), k = 1, 2, \dots, (3)$$

– наблюдение с выхода модуля позиционирования 5G, представляющее собой вектор измеренных значений координат БПЛА в гринвичской СК;

$$\mathbf{E}_n(t_k) = \Phi_{EE}\mathbf{E}_n(t_{k-1}) + \Phi_{Ex}\mathbf{X}(t_{k-1}) + \Gamma_E\mathbf{N}_E(t_{k-1}), \mathbf{E}_n(t_0) = \mathbf{E}_{n0} (4)$$

– вектор дискретных шумов измерения, определяемый погрешностями измерения координат БПЛА на выходе модуля позиционирования 5G, $\mathbf{H}(t_k), \Phi_{EE}, \Phi_{Ex}, \Gamma_E$ – известные матрицы, $\mathbf{N}_E(t_{k-1})$ – вектор независимых гауссовских случайных величин с нулевыми математическими ожиданиями и единичными дисперсиями.

Полезный сигнал ГНСС $S_i[t, \mathbf{Y}_i, \vartheta_{ik}, \lambda_{ik}]$ i -го НКА с учетом возможных отказов можно представить в виде

$$S_i[t, \mathbf{Y}_i, \vartheta_{ik}, \lambda_{ik}] = \lambda_{ik} A_i g_i(t - \tau_{zi}) \times \sin(\omega_i t + \varphi_i(t) + \vartheta_{ik}\pi) = \lambda_{ik} \widetilde{S}_i[t, \mathbf{Y}_i, \vartheta_{ik}], (5)$$

где A_i – амплитуда сигнала; $\tau_{zi} = d_i / c$ – задержка сигнала; ω_i – несущая частота сигнала; $g_i(t - \tau_{zi})$ – модулирующая функция (МФ) радиосигнала ГНСС; c – скорость света; $\widetilde{S}_i[t, \mathbf{Y}_i, \vartheta_{ik}]$ – полезный сигнал ГНСС i -го НКА без учета возможных отказов канала.

Специфика МШПС (ВОС-сигналов) полностью заключена в их МФ $g_i(t - \tau_{zi})$. Применительно к информационному сигналу в достаточно общем случае МФ $g(t)$ является результатом перемножения четырех последовательностей:

- 1) собственно прямоугольной псевдослучайной последовательности (ППСП) дальномерного кода,
- 2) меандрового поднесущего колебания (специфика ВОС-сигналов),
- 3) посылки навигационного сообщения,
- 4) посылки синхрокода для обеспечения тактовой синхронизации при функционировании системы [2].

Модулирующая функция $g_i(t - \tau_{zi})$ типового ВОС-сигнала, представляющая собой меандровую

псевдослучайную последовательность (МПСП) дальномерного кода, определяется соотношением вида

$$g_i(t - \tau_{zi}) = \partial(t - \tau_{zi})r(t - \tau_{zi}),$$

где $\partial(t)$ – ППСР дальномерного кода, которая также характерна и для традиционных ГНСС; $r(t)$ – меандровое поднесущее колебание, отражающее специфику ВОС-сигналов [2].

Таким образом, МПСР $g(t)$ образуется путем перемножения взаимно синхронизированных двоичных последовательностей $\partial(t)$ и $r(t)$, каждая из которых состоит из чередующихся единичных видеопульсов соответствующей длительности, меняющих свою полярность по определенным законам согласно кодовым коэффициентам, значения которых равны +1 или -1.

При рассмотрении параметров отказов λ_{ik} полагаем, что их значения на соседних тактовых интервалах образуют однородную марковскую цепь с матрицей вероятностей перехода

$$P^i = \begin{bmatrix} \pi_{\nu\mu}^i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p\{\lambda_i(t_{k+1}) = \mu | \lambda_i(t_k) = \nu\} \end{bmatrix} \quad (6)$$

и вектором вероятностей начального состояния

$$P_{i0} = \begin{bmatrix} p_{i1}(t_0), p_{i0}(t_0) \end{bmatrix}^T. \quad (7)$$

С учетом принятых допущений задача АКЦ сводится к получению оценок параметров отказов λ_{ik} , $i = 1..I$, характеризующих состояние информационных каналов видимого созвездия НКА.

Вектор состояния, подлежащий оцениванию, в рассматриваемом случае имеет вид

$$\mathbf{X}^T(t) = \begin{bmatrix} x, y, z, \mathbf{V}^T, \mathbf{A}^T, \mathbf{V}_{\text{п}}^T, \varphi_1, \dots, \varphi_I, \Delta\omega_1, \dots, \Delta\omega_I, \Delta, \delta d \end{bmatrix}, \quad (8)$$

где x, y, z – координаты ЛА; $\mathbf{V} = \begin{bmatrix} V_x, V_y, V_z \end{bmatrix}^T$, $\mathbf{A} = \begin{bmatrix} A_x, A_y, A_z \end{bmatrix}^T$, $\mathbf{V}_{\text{п}} = \begin{bmatrix} V_{\text{пх}}, V_{\text{пy}}, V_{\text{пz}} \end{bmatrix}^T$ – векторы проекций земной скорости, ускорения и постоянной составляющей земной скорости БПЛА на оси гринвичской СК; $\Delta = \begin{bmatrix} \Delta_x, \Delta_y, \Delta_z \end{bmatrix}^T$ – вектор постоянных ошибок определения ускорений в проекциях на оси гринвичской СК; δd – сдвиг шкалы времени (ШВ) БПЛА относительно ШВ НКА, выраженный в единицах дальности.

Связь вектора радионавигационных параметров i -го НКА с компонентами вектора состояния в общем виде описывается как $\mathbf{Y}_i(t) = L_i\{\mathbf{X}(t)\}$, где $L_i\{\bullet\}$ – известная функция.

В ряде случаев динамику вектора состояния $\mathbf{X}(t)$ удастся представить в виде линейного векторно-матричного дифференциального стохастического уравнения [5, 6]:

$$\dot{\mathbf{X}}^T(t) = \mathbf{F}\mathbf{X}(t) + \mathbf{C}\mathbf{U}(t) + \mathbf{G}\mathbf{N}(t), \mathbf{X}(t_0) = \mathbf{X}_0, \quad (9)$$

где $\mathbf{N}(t)$ – вектор формирующих БГШ с известными статистическими характеристиками; \mathbf{F} , \mathbf{C} и \mathbf{G} – известные матрицы состояния, управления и возмущения соответственно; $\mathbf{U}(t)$ – вектор управления, элементами которого являются известные на основе СИ проекции земной скорости НКА на оси гринвичской СК.

Таким образом, постановку задачи синтеза алгоритмов КОИ в АП с АКЦ ГНСС можно сформулировать следующим образом: имея априорные сведения о векторе состояния $\mathbf{X}(t)$ (8), параметрах отказов λ_{ik} (5), (6) и располагая наблюдениями (2) и (3), требуется определить оценку вектора состояния $\mathbf{X}^*(t)$, оптимальную по критерию минимума СКО, и оценки параметров отказов λ_{ik}^* , оптимальные по критерию максимума апостериорной вероятности. Далее будем полагать, что оценки дискретных параметров ϑ_{ik} формируются по соответствующим алгоритмам и являются известными [2, 4].

3. СИНТЕЗ АЛГОРИТМОВ КОМПЛЕКСНОЙ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ

Решение задачи синтеза алгоритмов КОИ в АП ГНСС выполнено методами марковской теории оценивания случайных процессов путем поэтапного решения уравнения Стратоновича и гауссовской аппроксимации апостериорной плотности вероятности (АПВ) [5].

Возможность применения метода поэтапного решения уравнения Стратоновича обусловлена обоснованным упрощением моделей оцениваемых процессов, суть упрощения заключается в описании динамики вектора состояния $\mathbf{X}(t)$ на полуинтервалах $[t_k, t_k + T)$ квазислучайным процессом [6]:

$$\mathbf{X}(t) = \mathbf{f}(t, \mathbf{X}_k), [t_k, t_k + T), \mathbf{X}(t_0) = \mathbf{X}_0,$$

где $\mathbf{f}(\bullet)$ – известная векторная функция своих аргументов.

Представление вектора состояния в виде квазислучайного процесса позволяет свести задачу нелинейного оценивания к задаче нелинейной оценки параметров. При этом удастся получить аналитическое решение соответствующего уравнения Стратоновича.

Кроме того, использование гауссовской аппроксимации АПВ позволяет получить выражения для апостериорных математических ожиданий и центральных моментов 2-го порядка, которые определяют субоптимальные алгоритмы формирования оценок вектора состояния на первом этапе, т.е. на этапе обработки наблюдений (2) [6].

Особенностью синтезированных таким образом субоптимальных алгоритмов является наличие перекрестных связей между каналами обработки

сигналов от различных НКА на уровне первичной обработки сигналов.

Наличие перекрестных связей между каналами обработки радиосигналов на уровне первичной обработки создает определенные трудности при их практической реализации и усложняет процедуру реконфигурации интегрированной системы. Так, при изменении в соответствии с текущими условиями функционирования состава совместно обрабатываемых сигналов потребуется изменять структуру алгоритмов, реализуемых на уровне первичной обработки радиосигналов.

Перекрестные связи между каналами обработки радиосигналов на уровне первичной обработки информации можно попытаться исключить, если выполнить их синтез в координатах радионавигационных параметров соответствующих полезных радиосигналов, а затем получить алгоритмы совместной обработки выходных данных этих каналов и модуля позиционирования 5G в координатах вектора состояния.

Предлагаемый подход к разработке подобных алгоритмов КОИ со структурно отдельной первичной обработкой радиосигналов ГНСС ГЛОНАСС и BeiDou заключается в последовательном синтезе

КОРС, на выходе которых формируются оценки параметров соответствующих радиосигналов (псевдодальностей, псевдоскоростей, случайных фаз) и алгоритмов обработки выходных данных этих каналов совместно с данными модуля позиционирования 5G.

Рассмотрим векторы радионавигационных параметров $\mathbf{Y}_i^T(t) = [d_i, \dot{d}_i, \varphi_i, \Delta\omega_i]$, $i = \overline{1, I}$, от которых непосредственно зависят полезные сигналы $S_i[t, \mathbf{Y}_i, \vartheta_{ik}, \lambda_{ik}]$ в наблюдениях (2).

Для задания динамики изменения векторов $\mathbf{Y}_i(t)$ на характерных полуинтервалах $[t_k, t_k + T)$ воспользуемся моделью в виде квазислучайного процесса:

$$\mathbf{Y}_i(t) = \mathbf{A}_i(t, \mathbf{Y}_{ik}), t \in [t_k, t_k + T), \mathbf{Y}_i(t_0) = \mathbf{Y}_{i0},$$

где $\mathbf{A}_i(\bullet)$ – известная векторная функция своих аргументов.

При этом квазиоптимальные в гауссовском приближении 1-го порядка алгоритмы обработки наблюдений $\xi_i(t)$, $i = \overline{1, I}$, на временном полуинтервале $[t_k, t_k + T)$, полученные на основе решения соответствующего уравнения Стратоновича на этапе обработки радиосигналов, применительно к одному из каналов описываются выражениями

$$\mathbf{Y}_i^*(t_k | t_k + T) = \mathbf{Y}_i^*(t_k) + \mathbf{R}_i(t_k | t_k + T) \lambda_{ik}^* \int_{t_k}^{t_k + T} \left[\frac{\partial F_i(\tau, \mathbf{Y}_{ik}^*)}{\partial \mathbf{Y}_{ik}^*} \right]^T d\tau = \mathbf{Y}_i^*(t_k) + \mathbf{R}_i(t_k | t_k + T) \lambda_{ik}^* \Phi_i'(t_k + T), \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{R}_i(t_k | t_k + T) &= \\ &= \left\{ \tilde{\mathbf{R}}_i^{-1}(t_k) - \lambda_{ik}^* \int_{t_k}^{t_k + T} \left[\frac{\partial}{\partial \mathbf{Y}_{ik}^*} \right]^T \left[\frac{\partial F_i(\tau, \mathbf{Y}_{ik}^*)}{\partial \mathbf{Y}_{ik}^*} \right] d\tau \right\}^{-1} = \\ &= \left\{ \tilde{\mathbf{R}}_i^{-1}(t_k) - \lambda_{ik}^* \Phi_i''(t_k + T) \right\}^{-1}, \quad (11) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \tilde{\mathbf{R}}_i^{-1}(t_k) &= \\ &= \mathbf{L}_i'^T(\mathbf{X}_k^*) \mathbf{R}_k \mathbf{L}_i'(\mathbf{X}_k^*), \mathbf{L}_i'(\mathbf{X}_k^*) = \left[\frac{\partial \mathbf{L}_i'(\mathbf{X}_k^*)}{\partial \mathbf{X}_k^*} \right], i = \overline{1, I}, \end{aligned}$$

где $\mathbf{Y}_i^*(t_k) = \mathbf{L}_i(\mathbf{X}_k^*)$, \mathbf{X}_k^* – оценка вектора состояния $\mathbf{X}(t)$ в момент времени t_k , формируемая в результате совместной обработки оценок радионавигационных параметров $\mathbf{Y}_i^*(t_{k-1} | t_{k-1} + T)$ и выходных данных модуля позиционирования 5G; $\mathbf{R}_i(t_k | t_k + T)$ – матрица центральных моментов 2-го порядка ошибок фильтрации компонент вектора \mathbf{Y}_i ; \mathbf{R}_k – матрица центральных моментов 2-го

порядка ошибок фильтрации компонент вектора \mathbf{X} , которые имеют место в результате совместной обработки наблюдений $\Xi(t_k)$ и $\mathbf{Y}_i^*(t_{k-1} | t_{k-1} + T)$;

$$F_i(t, \mathbf{Y}_{ik}^*) = N^{-1} \left\{ 2\xi_i(t) S_i(t, \mathbf{A}(t, \mathbf{Y}_{ik}^*)) - S_i^2(t, \mathbf{A}(t, \mathbf{Y}_{ik}^*)) \right\};$$

$\Phi_i'(t_k + T)$ и $\Phi_i''(t_k + T)$ – первая и вторая производные ЛФП соответственно.

Используемые в (10) и (11) оценки параметров отказов λ_{ik}^* формируются на основе апостериорных вероятностей, вычисленных в соответствии с выражением

$$\begin{aligned} p_{ij}(t_k + T | \mathbf{X}_k) &= C p_{ij}(t_k + T | \mathbf{X}_k) \times \\ &\times \exp \int_{t_k}^{t_k + T} F_i(t, \mathbf{L}_i \{ \mathbf{f}(t, \mathbf{X}_k) \} \lambda_{ik} = j) d\tau, j = 0, 1, \quad (12) \end{aligned}$$

где C – постоянный множитель, определяемый из условия нормировки;

$$p_{ij}(t_k | \mathbf{X}_k) = \sum_{l=0}^1 \pi_{lj}^i p_{ij}(t_{k-1} | \mathbf{X}_k).$$

При этом в качестве оптимальной оценки λ_{ik}^* выбирается значение параметра отказа, для которого апостериорная вероятность (12) максимальна:

$$\lambda_{ik}^* = \lambda_{ik} : \max_j p_{ij}(t_k + T | \mathbf{X}_k), j = 0, 1.$$

Рассматривая далее оценки $\mathbf{Y}_i^*(t_{k-1} | t_{k-1} + T)$ в качестве наблюдений, получим алгоритмы

оптимального дискретного оценивания значений компонент вектора состояния $\mathbf{X}(t)$. Реализация этих алгоритмов, по сути, является второй ступенью обработки информации.

Если условия применимости метода гауссовской аппроксимации выполняются, то указанные алгоритмы могут быть представлены в виде

$$\mathbf{X}_{k+1}^* = \mathbf{X}_\ominus + \mathbf{K}_{k+1} \left[\begin{array}{c} \Phi'(t_k + T) \\ \Xi_{k+1} - \mathbf{H}_{k+1} - \Phi_{Ex} \mathbf{X}_k^* - \Phi_{EE} [\Xi_{k+1} - \mathbf{H}_k \mathbf{X}_k^*] \end{array} \right] = \mathbf{X}_\ominus + \mathbf{K}_{k+1} \mathbf{Z}_{k+1}, \quad (13)$$

где $\mathbf{X}_\ominus = \Phi_{xx} \mathbf{X}_k^*$ – экстраполированная оценка вектора состояния на момент времени t_{k+1} ; $\Phi'(t_k + T) = [\Phi'_1(t_k + T), \dots, \Phi'_l(t_k + T)]^T$ – значения первых производных ЛФП; \mathbf{K}_{k+1} – матрица оптимальных коэффициентов передачи; \mathbf{Z}_{k+1} – вектор невязок измерений.

Структурная схема системы, реализующей полученные алгоритмы, представлена на рис. 1. Основными элементами схемы являются: каналы обработки радиосигналов, блок управления структурой, блок обработки данных и блок обратного преобразования координат.

Особенностью полученных алгоритмов является отсутствие перекрестных связей между каналами обработки радиосигналов, но достоинства комплексирования на уровне первичной обработки сохраняются, так как формирование опорных сигналов осуществляется на основе оценок

навигационных параметров, являющихся результатом комплексной обработки радионавигационных параметров и выходных данных модуля позиционирования 5G на второй ступени обработки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные алгоритмы со структурно отдельной первичной обработкой радиосигналов могут быть рекомендованы для использования в бортовой интегрированной аппаратуре БПЛА, предназначенной для работы в умеренно сложной помеховой обстановке в условиях массовой застройки современных мегаполисов. При этом удастся получить бортовую систему позиционирования, отличающуюся простотой практической реализации при сравнительно невысоких требованиях к вычислительным возможностям. Кроме того, полученные алгоритмы могут быть реализованы

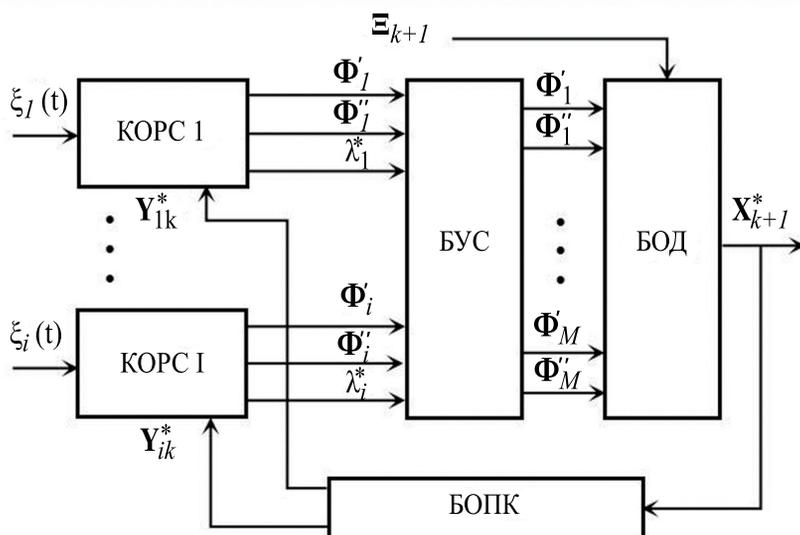


Рис. 1. Структурная схема системы комплексной обработки информации: КОРС I, КОРС I – каналы обработки радиосигналов, БУС – блок управления структурой, БОД – блок обработки данных, БОПК – блок обратного преобразования координат.

в локальных ККС, при условии ретрансляции сигналов ГНСС, принимаемых на борту БПЛА, и передачи данных о местоположении от модуля позиционирования 5G. При этом ККС может совмещать присущие ей функции с решением задач пункта дистанционного пилотирования, наличие которого является обязательным в случае реализации БПЛА в формате дистанционно пилотируемой авиационной системы (ДПАС). Следует отметить, что ДПАС являются новым компонентом авиационной системы в целом, изучением, определением и, в конечном итоге, интеграцией которого в настоящее время занимаются Международная организация гражданской авиации, государства и отраслевые организации.

Авторы данной работы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Болелов Э.А., Кудинов А. Т., Шикалов В. Н. и др. // Научный вестник ГосНИИ ГА. 2022. № 40. С. 132.
2. Ярлыков М.С. Меандровые шумоподобные сигналы (ВОС-сигналы) в новых спутниковых радионавигационных системах. М.: Радиотехника, 2017.
3. Фокин Г.А. Технологии сетевого позиционирования 5G. М.: Горячая линия–Телеком, 2021.
4. Болдин В.А., Зубинский Ю.Г., Зурабов Ю.Т. Глобальная спутниковая радионавигационная система ГЛОНАСС. М.: ИПРЖР, 1998.
5. Ярлыков М.С., Миронов М.А. Марковская теория оценивания случайных процессов. М.: Радио и связь, 1993.
6. Ярлыков М.С., Кудинов А.Т. // Радиотехника. 1998. № 2. С. 3.

COMPLEX PROCESSING OF GLOBAL NAVIGATION SATELITE SYSTEM SIGNALS AND 5G POSITIONING MODULES FOR THE PURPOSE OF NAVIGATION SUPPORT FOR UNMANNED AERIAL VEHICLE FLIGHTS IN THE CONDITIONS OF MASS DEVELOPMENT OF MODERN MEGACITIES

E. A. Bolelov*, A. T. Kudinov, N. M. Romanenko

*Moskovsky State Technical University of Civil Aviation,
Kronshtadtsky Boulevard, 20, Moscow, 125993 Russia
E-mail: edbolelov@mail.ru

Received April 21, 2024, revised April 21, 2024, accepted April 25, 2024

An approach to the construction of on-board consumer equipment for global navigation satellite systems as part of the on-board equipment of unmanned aerial vehicles (UAVs) is considered. The analysis of the features of the navigation support of UAVs in the process of implementing various scenarios of their application is carried out. The Markov theory of optimal estimation of random processes has been used to obtain algorithms for complex signal processing of a satellite radio navigation system and a 5G positioning module for the case of structurally separate processing of radio signals. A block diagram of the system is presented, a characteristic feature of which is the absence of cross-links between the channels of radio signal processing.

Keywords: Global navigation satellite systems, integrated information processing, Markov theory of random process estimation, meander noise-like signals, GLONASS, BeiDou, unmanned aerial vehicles, 5G positioning module