

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ СИНТЕЗА ОПТИМАЛЬНОГО АЛГОРИТМА КОМПЛЕКСНОЙ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ О ПРОСТРАНСТВЕННОМ ПОЛОЖЕНИИ АЭРОЛОГИЧЕСКОГО РАДИОЗОНДА

Э.А. БОЛЕЛОВ, Ю.М. ЕРМОШЕНКО

В статье рассматривается вариант постановки задачи синтеза оптимального алгоритма комплексной обработки сигналов спутниковых навигационных систем ГЛОНАСС/GPS, ретранслированных с борта аэрологического радиозонда, и выходных данных аэрологической радиолокационной станции в целях определения пространственных координат аэрологического радиозонда. Аэрологическое радиозондирование производится с помощью технических средств – системы радиозондирования атмосферы, включающей аэрологический радиозонд, выпускаемый в свободный полет, и наземное оборудование, в состав которого входят устройства для обработки сигналов аэрологического радиозонда и подготовки оперативного аэрологического сообщения. Особенностью отечественных систем радиозондирования атмосферы является измерение радиолокационным методом наклонной дальности до аэрологического радиозонда, углы визирования антенны аэрологической радиолокационной станции определяют азимут и угол места аэрологического радиозонда. Недостатком радиолокационного метода сопровождения радиозонда является достаточно низкая точность определения координат радиозонда и возможные срывы автосопровождения по угловым координатам. Спутниковые навигационные системы радиозондирования имеют принципиальные преимущества по экономичности, габаритам, мобильности, и использованию на подвижных объектах, однако обладают существенными недостатками, связанными, прежде всего, с геометрическим фактором и ошибками распространения навигационного сигнала. В статье представлены математические модели полезных некогерентных сигналов ГЛОНАСС/GPS, ретранслированных аэрологическим радиозондом, и помех на входе приемного устройства наземного пункта комплексной обработки информации, а также математические модели выходных данных аэрологической радиолокационной станции.

Ключевые слова: вектор состояния, вектор наблюдения, комплексная обработка информации, аэрологический радиозонд, комплексный оптимальный алгоритм, система радиозондирования атмосферы, аэрологическая радиолокационная станция.

ВВЕДЕНИЕ

Во всем мире производятся одновременные метеорологические наблюдения по единому гринвичскому времени. В программу наблюдений входит измерение метеорологических величин (температуры, влажности, давления, видимости, ветра и т. д.) и наблюдение за метеорологическими явлениями. Кроме метеорологических наблюдений производятся и аэрологические наблюдения – регулярное измерение свойств воздуха и параметров атмосферных процессов (параметров ветра, атмосферного давления, температуры и влажности воздуха) вне приземного слоя на высотах до 40 км с помощью аэрологических приборов (радиозондов). Основными сроками аэрологических наблюдений установлены 0 и 12 часов по гринвичскому времени. Для обслуживания авиации проводят наблюдения в дополнительные сроки через каждые 3 или 1 час.

Аэрологическое радиозондирование производится с помощью технических средств – системы радиозондирования атмосферы (СРА), включающей аэрологический радиозонд (АРЗ), выпускаемый в свободный полет, и наземное оборудование, в состав которого входят устройства для обработки сигналов АРЗ и подготовки оперативного аэрологического сообщения (телеграммы).

Отличительной особенностью отечественных систем радиозондирования атмосферы (СРА) является измерение радиолокационным методом наклонной дальности до АРЗ, снабженного сверхрегенеративным приемопередатчиком, обеспечивающим активный ответный сигнал. Запросный радиоимпульс от аэрологической радиолокационной станции (АРЛС) вызывает изменение структуры радиоимпульсов, постоянно излучаемых приемопередатчиком АРЗ, выражающееся в появлении «паузы». Временная задержка от момента формирования запросного

сигнала АРЛС до «паузы» в ответном сигнале АРЗ, принимаемом АРЛС, определяет значение наклонной дальности. Углы визирования антенны определяют азимут и угол места АРЗ. Координаты АРЗ (наклонная дальность, азимут и угол места) используются для вычисления скорости и направления ветра в слоях, через которые пролетает АРЗ. Высота подъема АРЗ вычисляется, как правило, по данным измерений координат АРЗ. Основные типы АРЛС, используемые на аэрологической сети: АВК-1, АВК-1М, МАРЛ-А, Вектор-М, БРИЗ, РАМ.

Недостатком СРА, основанных на радиолокационном методе, является возможный срыв автосопровождения АРЗ по угловым координатам из-за узкой диаграммы направленности при сильном боковом ветре в момент запуска и принципиальное снижение точности определения высоты подъема радиозонда из-за ограниченной точности измерения угловых координат при значительных удалениях АРЗ. Вместе с тем достоинством таких СРА является полная автономность работы, приемлемая точность измерения координат АРЗ и метеорологических параметров в оперативном радиусе работы до 250 км.

В настоящее время во многих странах мира используются спутниковые навигационные системы радиозондирования. Подобные системы разрабатываются зарубежными фирмами Air, Vaisala, Graw. Эти станции имеют принципиальные преимущества по экономичности, габаритам, мобильности и использованию на подвижных объектах. Существуют отечественные разработки мобильной навигационной системы радиозондирования атмосферы на базе спутниковых навигационных систем (СНС) ГЛОНАСС/GPS (система «Полус»). Отличительной особенностью этой системы является то, что в АРЗ (МРЗ-Н1) конструктивно включен навигационный модуль ГЛОНАСС/GPS. Координаты АРЗ передаются по радиоканалу на наземную станцию в цифровом виде. Проведенные испытания показали, что точность измерения координат АРЗ достаточна для обеспечения тактико-технических требований к СРА [2].

Однако для спутниковых навигационных СРА характерны недостатки, связанные с:

- ошибками распространения навигационного сигнала (ионосферная ошибка, тропосферная ошибка, ошибка, обусловленная многолучевостью);
- ошибками, обусловленными взаимным расположением навигационных космических аппаратов (НКА) и АРЗ (геометрический фактор);
- ошибками приемника навигационного модуля АРЗ (шумы приемника, помехи, пропадание сигналов СНС, нарушение целостности системы, ситуации, связанные с нештатным функционированием НКА).

В качестве примера интересна ситуация нештатного функционирования НКА № 22 системы ГЛОНАСС. 10 и 11 октября 2005 г. этот НКА был помечен в альманахе и эфемеридах как «здоровый», но при этом фактически качество его функционирования ухудшилось. Это проявилось в виде аномально высокой растущей во времени погрешности измерения псевдодальности, которая к моменту обнаружения его состояния составила 10500 метров [5].

На значение погрешности измерения навигационных параметров влияет и еще один факт – это избирательный доступ (Selective Availability), искусственное снижение точности спутникового сигнала в GPS, вводимое МО США. Это приводило к тому, что точность полученных координат с помощью GPS снижалась до 100 и более метров. Известно, что МО США включало режим избирательного доступа над территорией боевых действий армии США (Ирак, Афганистан, Югославия и т.д.) для дезориентации противника. Не может быть исключен факт включения режима S/A над территорией России в рамках санкционной политики США.

Кроме этого, использование навигационного модуля ГЛОНАСС/GPS в АРЗ повышает стоимость самого АРЗ, что является одним из недостатков.

Известно [2], что общей проблемой производства и эксплуатации систем радиозондирования атмосферы (СРА) является создание высокоточных систем определения координат АРЗ, недорогих конструкций АРЗ, обеспечивающих измерение метеорологических параметров атмосферы с необходимой точностью, надежную передачу информации с борта АРЗ на наземную станцию в оперативном радиусе действия СРА.

Возможными способами разрешения данной проблемы могут быть:

1) установка на АРЗ не навигационного модуля СНС ГЛОНАСС/GPS, а более дешевого ретранслятора навигационных сигналов СНС ГЛОНАСС/GPS, с последующей их обработкой на наземной станции СРА;

2) комплексная обработка сигналов СНС ГЛОНАСС/GPS, ретранслированных АРЗ и данных, полученных с помощью АРЛС.

Наземная станция СРА в этом случае будет комплексной (основу ее будет составлять наземный пункт комплексной обработки информации (КОИ)), что позволит:

- повысить помехоустойчивость;
- улучшить электромагнитную совместимость (ЭМС);
- получить требуемую точность определения координат АРЗ;
- обеспечить надежную передачу информации с борта АРЗ на наземную станцию.

К универсальным теоретическим методам синтеза алгоритмов КОИ относится марковская теория оптимального нелинейного оценивания случайных процессов [1]. Суть марковской теории оптимального нелинейного оценивания случайных процессов (МТО) представляет собой созданный на единой основе марковских и условных марковских процессов строгий и корректный (обычно векторно-матричный) математический аппарат, базирующийся на основных положениях теории статистических решений. Методы и алгоритмы МТО непосредственно ориентированы на применение цифровой, гибридной и другой современной и перспективной технологии.

Наибольший выигрыш от комплексирования измерителей пространственных координат АРЗ, естественно, удастся получить, решив соответствующую задачу синтеза, что дает возможность определить оптимальные структуру и характеристики системы КОИ [1, 3]. Широкие возможности методов МТО при разработке алгоритмов КОИ во многом обусловлены тем, что марковские методы позволяют реализовать оптимальное комплексирование измерителей не только на уровне вторичной обработки информации (обработка данных), как это возможно при использовании методов калмановской фильтрации, но и при первичной обработке информации (обработка сигналов). Комплексирование на уровне первичной обработки информации позволяет повысить качество функционирования измерителей в аномальных (нелинейных) режимах их работы (режимы срыва слежения, ложные захваты параметров и т. д.), тем самым улучшая характеристики измерителей (например, точности и помехоустойчивости) в режиме слежения.

Применительно к задаче синтеза оптимального алгоритма КОИ о пространственном положении АРЗ, аппарат МТО на уровне первичной обработки информации предполагает:

- разработку математических моделей полезных сигналов, помех, информационных и сопутствующих процессов;
- выбор критерия оптимизации и математически корректной постановки задачи синтеза оптимального алгоритма КОИ.

Данная статья посвящена рассмотрению математических моделей полезных сигналов и помех СНС ГЛОНАСС/GPS на входе наземного пункта КОИ (НПКОИ), математических моделей выходных данных АРЛС, информационных и сопутствующих процессов, а также постановке задачи синтеза оптимального алгоритма КОИ о пространственном положении АРЗ.

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ПОЛЕЗНЫХ РЕТРАНСЛИРОВАННЫХ СИГНАЛОВ СНС И ПОМЕХ НА ВХОДЕ ПРИЕМНОГО УСТРОЙСТВА НПКОИ И ВЫХОДНЫХ ДАННЫХ АРЛС

Сигналы СНС должны обеспечивать: заданную точность измерения радионавигационных параметров (РНП) и требуемую вероятность декодирования служебной информации; минимальную мощность излучения передатчика НКА при ограниченной ширине полосы излучения; разделимость сигналов от различных НКА; устойчивость к помехам много-

лучевости, к помехам по радиодиапазону; ограниченность аппаратных затрат в аппаратуре потребителя и возможность повышения точностных характеристик с развитием системы. В связи с этим в СНС используются широкополосные сигналы (ШПС), которые формируются в результате фазовой манипуляции частоты псевдослучайной последовательностью (ПСП) чисел ± 1 [4].

В случае кодового разделения сигналов, использования двух ПСП и двухчастотного метода коррекции ионосферных ошибок в определении дальности до i -го НКА ($i = \overline{1, I}$, где I – общее число НКА, доступных для наблюдения) сигналы, излучаемые каждым НКА на интервале времени $t \in [t_k, t_k + T]$ передачи символа служебной информации, могут быть описаны выражениями [4]

$$S_{1i}(t, \theta_k, \varphi_{1k}) = A_T g_{Ti}(t) \cos(\omega_1 t + \theta_{ki} \pi + \varphi_{1i}(t)) + A_T g_{Ti}(t) \sin(\omega_1 t + \theta_{ki} \pi + \varphi_{1i}(t)), \quad (1)$$

$$S_{2i}(t, \theta_k, \varphi_{2k}) = B_T g_{Ti}(t) \cos(\omega_2 t + \theta_{ki} \pi + \varphi_{2i}(t)), \quad (2)$$

где A_T , A_T , B_T – амплитуда излучаемых сигналов, модулируемых различными ПСП (точным и грубым кодом); $g_{Ti}(t) = \sum_{k=1}^K a_{ki} \text{rect}(t - (k-1)\tau_{uT})$, $g_{Ti}(t) = \sum_{n=1}^N \sum_{l=1}^L a_{li} \text{rect}(t - (n-1)T_n - (l-1)\tau_{uT})$ – огибающие сигналов от i -го НКА с длительностями элементарных импульсов модулирующих ПСП τ_{uT} и τ_{uT} (для GPS: $\tau_{uT} = 98$ нс и $\tau_{uT} = 980$ нс, для ГЛОНАСС: $\tau_{uT} = 200$ нс и $\tau_{uT} = 2000$ нс); k и l – номер посылки модулирующих ПСП; n – номер модулирующей ПСП грубого кода; $(k-1)\tau_{uT}$ – момент излучения k -го импульса ПСП точного кода; $(n-1)T_n - (l-1)\tau_{uT}$ – момент излучения l -й посылки в n -й ПСП грубого кода; $T_n = 1$ мс – период ПСП грубого кода; ω_1 и ω_2 – несущие частоты (для GPS: $\omega_1 = 1575,42$ МГц и $\omega_2 = 1227,6$ МГц, для ГЛОНАСС: $\omega_1 = 1602\text{--}1615$ МГц (диапазон L1) и $\omega_2 = 1246\text{--}1256$ МГц (диапазон L2)); $\varphi_{1i}(t)$ и $\varphi_{2i}(t)$ – случайные фазы радиосигналов, обусловленные нестабильностью частоты задающих генераторов НКА; a_{ki} и a_{li} – коэффициенты, принимающие значения ± 1 в зависимости от модулирующей ПСП; θ_{ki} – дискретный параметр, принимающий в течение времени $T = 20$ мс значение 0 или 1 в зависимости от передаваемой каждым НКА служебной информации; L – длина ПСП грубого кода; $K = \frac{T}{\tau_{uT}}$ – количество излученных импульсов ПСП грубого кода за время T (для GPS:

$K = 20408$, для ГЛОНАСС: $K = 10000$); $N = \frac{T}{T_n}$ – количество периодов ПСП грубого кода излученных за время T ($N = 20$)

Принятый от одного НКА полезный некогерентный сигнал СНС на входе приемника транслятора АРЗ на интервале $t \in [t_k, t_k + T]$ можно представить в виде

$$S_i(t, Y_i, \theta_{ki}) = A_i(t) g_i(t - \tau_i) \cos(\omega_i t + \theta_{ki} \pi + \varphi_i(t)), \quad (3)$$

где: $A_i(t)$ – амплитуда сигнала; $g_i(t)$ – огибающая сигнала СНС; $\tau_i = \frac{d_i}{c}$ – псевдозадержка сигнала; d_i – псевдодальность по направлению НКА-АРЗ; $\varphi_i(t)$ – случайная фаза сигнала; c – скорость света; $Y_i(t) = [d_i(t), \dot{d}_i(t), \varphi_i(t), \Delta\omega_i(t)]^T$ – вектор РНП, от которого непосред-

ственно зависит радиосигнал i -го НКА; $\dot{d}_i(t)$ – радиальная псевдоскорость i -го НКА; $\Delta\omega_i(t)$ – уход частоты задающего генератора i -го НКА.

Псевдодальность до одного из НКА определяется выражением

$$d = d_1 + \Delta d_{is} + \Delta d_{ts} + \Delta d_{eph} + \Delta d_{\phi} + \Delta d_{tl}, \quad (4)$$

где d_1 – расстояние от НКА до АРЗ в момент излучения и приема сигнала; Δd_{is} – прирост дальности за счет ионосферной задержки сигнала; Δd_{ts} – прирост дальности за счет тропосферной задержки сигнала; Δd_{eph} – прирост дальности за счет неточного прогноза эфемерид; Δd_{ϕ} – небольшие случайные изменения псевдодальности, вызванные, например, осцилляциями и уходом частоты цезиевого и рубидиевого стандарта передатчика НКА; Δd_{tl} – прирост дальности, вызванный сдвигом шкал времени на АРЗ и НКА. Необходимо отметить, что при некогерентной обработке сигналов СНС сдвигом системной шкалы времени (СШВ) и шкалы времени (ШВ) НКА можно пренебречь ввиду его малости (сдвиг СШВ и ШВ НКА не превышает 10 нс).

Будем считать, что на АРЗ установлен широкополосный аналоговый ретранслятор (ШАР). Преобразование сигнала в ШАР – это перенос спектра исходного сигнала с одной несущей частоты на другую. Теоретически такое преобразование является линейным и в идеальном случае не искажает составляющих спектра исходного сигнала. Таким образом, ШАР представляет собой устройство, осуществляющее перенос спектра сигналов НКА (при сохранении его формы) на некоторую другую несущую частоту ω_p и излучение преобразованного сигнала, при этом задержка сигнала в ретрансляторе $\tau_{шар}$ известна для каждого типа ШАР.

В системе радиозондирования атмосферы используются две частоты – 1680 МГц и 403 МГц [2]. В силу близости частоты 1680 МГц к диапазону L1 в дальнейшем будем считать, что ретранслятор АРЗ переизлучает сигнал НКА на этой частоте.

Сигнал i -го НКА, переизлучаемый ШАР АРЗ может быть представлен в виде:

$$\tilde{S}_{ip}(t, Y_i, \theta_{ki}) = A_p g_i(t - (\tau_i + \tau_{шар})) \cos(\omega_p t + \theta_{ki} \pi + \tilde{\varphi}_p(t)), \quad (5)$$

где A_p – амплитуда ретранслированного сигнала; $\tilde{\varphi}_p(t)$ – случайная фаза ретранслированного сигнала, обусловленная нестабильностью частоты задающего генератора АРЗ.

Сигнал, принятый на НПКОИ может быть представлен в виде

$$S_{ip}(t, Y_i, \theta_{ki}) = A_p(t) g_i(t - \tau_{i\Sigma}) \cos(\omega_p t + \theta_{ki} \pi + \varphi_{pi}(t)), \quad (6)$$

где $A_p(t)$ – амплитуда принятого ретранслированного сигнала; $\varphi_{pi}(t)$ – случайная фаза принятого ретранслированного сигнала; $\tau_{i\Sigma} = \frac{d_{i\Sigma}}{c}$ – результирующая псевдозадержка; $d_{i\Sigma}$ – результирующая псевдодальность по направлению НКА – АРЗ – НПКОИ, являющаяся основным радионавигационным параметром.

Псевдодальность d_{Σ} для одного НКА можно представить в виде:

$$d_{\Sigma} = d_1 + d_2 + \Delta d_{is} + \Delta d_{ts} + \Delta d_{eph} + (\Delta d_{\phi} + \Delta d_{\phi p}) + \Delta d_{tl} + \Delta d'_{tl} + \Delta d_{шар}, \quad (7)$$

где: d_2 – расстояние от АРЗ до НПОИ в момент излучения и приема сигнала; $\Delta d_{\phi p}$ – случайные изменения псевдодальности, вызванные, например, осцилляциями и уходом частоты

задающего генератора передатчика ШАР АРЗ; $\Delta d'_{cl}$ – прирост дальности, вызванный сдвигом шкал времени на АРЗ и НПКОИ; $\Delta d_{шар}$ – прирост дальности, обусловленный временем задержки сигнала в ретрансляторе $\tau_{шар}$.

Таким образом, вектор РНП имеет вид $\mathbf{Y}_i(t) = [d_{i\pi}(t), \dot{d}_{i\pi}(t), \phi_{pi}(t), \Delta\omega_{pi}(t)]^T$. Существенным фактором, влияющим на точность определения радионавигационных параметров $\mathbf{Y}_i(t)$, являются помехи [1, 3, 4].

Мощность помех на входе приемного устройства сигналов СНС НПКОИ определяется как сумма из приведенной ко входу мощности внутренних шумов приемного устройства и мощности внешних помех. Наиболее характерными для СНС являются широкополосные флуктуационные помехи, к которым относятся помехи, обусловленные собственными шумами приемника СНС, флуктуационным характером поглощения радиоволн в атмосфере, тепловым излучением Земли и т. д. Широкополосные флуктуационные помехи могут быть описаны моделью белого гауссовского шума (БГШ) со следующими статистическими характеристиками:

$$M\{n_i(t)\} = 0, \quad M\{n_i(t)n_i(t-\tau)\} = \frac{N}{2}\delta(\tau), \quad (8)$$

где: $N = KT_{noise}$ – спектральная плотность шумов; $K = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ В} \cdot \text{с} / \text{К}$ – постоянная Больцмана; T_{noise} – эквивалентная шумовая температура внешних шумов приемного устройства СНС НПКОИ; $\delta(\tau)$ – дельта функция Дирака.

При этих условиях наблюдение на входе приемного устройства СНС НПКОИ можно представить в виде

$$\xi_i(t) = S_{ip}(t, \mathbf{Y}_i, \theta_{ki}) + n_i(t). \quad (9)$$

Отечественные аэрологические системы радиозондирования включают в свой состав АРЛС различных типов, в которых используется радиопеленгационный и радиолокационный методы определения координат АРЗ. В радиопеленгационном методе АРЛС измеряет угловые координаты АРЗ (угол места β и азимут α). Высота $h_{АРЗ}$ определяется с помощью барометрического датчика, установленного на АРЗ, путем вычисления по барометрической формуле для стандартной атмосферы. В радиолокационном методе АРЛС измеряет угловые координаты АРЗ (угол места β и азимут α) и наклонную дальность $D_{АРЗ}$. Измерение наклонной дальности $D_{АРЗ}$ проводится методом вторичной радиолокации в соответствии с выражением

$$D_{АРЗ} = \frac{c}{2}(\tau_d - \tau_{АРЗ}) + \Delta D, \quad (10)$$

где τ_d – время распространения сигнала от РЛС до АРЗ, $\tau_{АРЗ}$ – известная задержка сигнала в ответчике АРЗ; ΔD – поправка, учитывающая условия распространения сигнала в атмосфере.

В обоих методах используется сферическая система координат (ССК), центр которой совмещен с НПКОИ. Для определенности будем считать, что используется радиолокационный метод определения координат АРЗ. Выходные данные АРЛС в ССК будут иметь вид

$$\tilde{\Xi}(k) = \tilde{H}\tilde{X}(k) + \tilde{E}(k), \quad (11)$$

где $\tilde{\Xi}(k) = [\xi_\alpha(k), \xi_\beta(k), \xi_d(k)]^T$ – вектор наблюдения, компоненты которого представляют собой выходные данные АРЛС в ССК; $\tilde{X}(k) = [\alpha(k), \beta(k), D_{AP3}(k)]^T$ – вектор истинных значений координат АРЗ в ССК; $\tilde{H}$ – известная матрица наблюдения; $\tilde{E}(k) = [\varepsilon_\alpha(k), \varepsilon_\beta(k), \varepsilon_d(k)]^T$ – вектор флуктуационных погрешностей измерений АРЛС, компоненты которого описываются рекуррентными выражениями вида

$$\varepsilon_\alpha(k) = \mu\varepsilon_\alpha(k-1) + \nu n_\alpha(k-1), \quad \varepsilon_\alpha(0) = \varepsilon_{\alpha 0}, \quad (12)$$

$$\varepsilon_\beta(k) = \mu\varepsilon_\beta(k-1) + \nu n_\beta(k-1), \quad \varepsilon_\beta(0) = \varepsilon_{\beta 0}, \quad (13)$$

$$\varepsilon_d(k) = \mu\varepsilon_d(k-1) + \nu n_d(k-1), \quad \varepsilon_d(0) = \varepsilon_{d 0}, \quad (14)$$

где $\mu = e^{-\gamma T}$; $\nu = \sqrt{\sigma_\varepsilon^2(1-\mu^2)}$; γ – коэффициент, определяющий ширину спектра флуктуаций погрешности; σ_ε^2 – дисперсия флуктуационной погрешности; $n_\alpha(k)$, $n_\beta(k)$, $n_d(k)$ – формирующие БГШ с нулевыми математическими ожиданиями и единичными дисперсиями.

Практическая реализация алгоритмов обработки информации в АРЛС НПКОИ, как правило, производится в цифровой форме. В этом случае выходные данные АРЛС представляются в дискретные моменты времени t_k , $k = 0, 1, 2, \dots$, что отражено в выражениях (11–14).

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ИНФОРМАЦИОННЫХ И СОПУТСТВУЮЩИХ ПРОЦЕССОВ

При синтезе алгоритмов комплексной обработки информации в НПКОИ на основе СНС и АРЛС в качестве единой системы координат, в которой предполагается оценивать пространственные координаты АРЗ, целесообразно выбрать гринвичскую прямоугольную систему координат (ГПСК). Данный выбор обусловлен следующим:

- в СНС используются геоцентрические прямоугольные системы координат (ПЗ90 и WGS-84), которые отличаются лишь по положению оси OZ, причем отличие это составляет всего лишь 0,4 угловых секунды. Ошибка определения координат точки на поверхности Земли в среднем составляет не более 5 м;

- в СНС используется псевдодальномерный метод навигационных определений, при котором выражения, описывающие связь РНП с навигационными параметрами, оказываются наиболее простыми, если последние определяются в какой-либо из декартовых систем координат.

Для случая, когда пространственные координаты АРЗ определяются в ГПСК, вектор состояния может быть определен в виде:

$$X(t) = [x(t), y(t), z(t), V_x(t), V_y(t), V_z(t), a_x(t), a_y(t), a_z(t), \varphi_p(t), \Delta\omega_p(t), \delta d(t)]^T, \quad (15)$$

где: x, y, z – пространственные координаты АРЗ в ГПСК; $V_x, V_y, V_z, a_x, a_y, a_z$ – проекции земной скорости и ускорения АРЗ на оси ГПСК; δd – ошибка определения дальности, вызванная факторами, рассмотренными в (4) и (7); $\varphi_p, \Delta\omega_p$ – случайная фаза принятого ретранслированного

сигнала и уход частоты задающего генератора ретранслятора АРЗ, которые описываются дифференциальными уравнениями

$$\dot{\varphi}_{pi}(t) = \Delta\omega_p(t) - \frac{\omega_p}{c} \dot{d}_{i\Sigma}(t) + \sqrt{\frac{N_\varphi}{2}} n_\varphi(t), \quad \varphi_{pi}(0) = \varphi_{pi0}, \quad (16)$$

$$\Delta\dot{\omega}_{pi}(t) = -\vartheta_\omega \Delta\omega_{pi}(t) + \sqrt{2\vartheta_\omega \sigma_\omega^2} n_{\Delta\omega}(t), \quad \Delta\omega_{pi}(0) = \Delta\omega_{pi0}, \quad (17)$$

где: $\frac{\omega_p}{c} \dot{d}_{i\Sigma}(t)$ – доплеровское смещение частоты; N_φ – величина, характеризующая естественную нестабильность задающего генератора; $n_\varphi(t), n_{\Delta\omega}(t)$ – формирующие БГШ с нулевыми математическими ожиданиями и единичными дисперсиями; ϑ_ω – коэффициент, характеризующий ширину спектра флуктуаций частоты задающего генератора; σ_ω^2 – дисперсия флуктуаций частоты задающего генератора.

Динамику изменения пространственных координат АРЗ в ГПСК можно представить в виде системы дифференциальных уравнений:

$$\dot{x}(t) = V_x(t), x(0) = x_0, \quad \dot{y}(t) = V_y(t), y(0) = y_0, \quad \dot{z}(t) = V_z(t), z(0) = z_0, \quad (18)$$

$$\dot{V}_x(t) = a_x(t), V_x(0) = V_{x0}, \quad \dot{V}_y(t) = a_y(t), V_y(0) = V_{y0}, \quad \dot{V}_z(t) = a_z(t), V_z(0) = V_{z0}, \quad (19)$$

$$\begin{aligned} \dot{a}_x(t) &= -(\rho_1 + \rho_2) a_x(t) + \sqrt{(\rho_1 + \rho_2) \sigma_{ax}^2} n_{ax}(t), \quad a_x(0) = a_{x0}, \\ \dot{a}_y(t) &= -(\rho_1 + \rho_2) a_y(t) + \sqrt{(\rho_1 + \rho_2) \sigma_{ay}^2} n_{ay}(t), \quad a_y(0) = a_{y0}, \\ \dot{a}_z(t) &= -(\rho_1 + \rho_2) a_z(t) + \sqrt{(\rho_1 + \rho_2) \sigma_{az}^2} n_{az}(t), \quad a_z(0) = a_{z0}, \end{aligned} \quad (20)$$

где: ρ_1 – коэффициент, определяемый аэродинамическими характеристиками АРЗ; ρ_2 – параметр, характеризующий ширину спектра флуктуаций скорости ветра; $n_{ax}(t), n_{ay}(t), n_{az}(t)$ – формирующие БГШ с нулевыми математическими ожиданиями и единичными дисперсиями; $\sigma_{ax}^2, \sigma_{ay}^2, \sigma_{az}^2$ – дисперсии флуктуаций ускорения, зависящие от характера движения АРЗ в атмосфере.

Ошибка определения дальности $\delta d(t)$ представляет собой неизвестную, но постоянную на интервале времени $t \in [t_k, t_k + T]$ величину. Постоянство $\delta d(t)$ справедливо только на интервале $t \in [t_k, t_k + T]$ и предполагает достаточно высокую стабильность задающего генератора. Тогда, математическая модель динамики измерения $\delta d(t)$ имеет вид:

$$\delta\dot{d}(t) = 0, \quad \delta d(0) = \delta d_0. \quad (21)$$

Связь вектора РНП, применительно к i -му НКА, и вектора состояния определяется оператором преобразования $L\{\cdot\}$. Непосредственно вид оператора $L\{\cdot\}$ определяется выражениями:

$$d_{i\Sigma} = l_d \{ \mathbf{X}(t) \} = \sqrt{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2 + (z_i - z)^2} + \sqrt{(x - x_{nn})^2 + (y - y_{nn})^2 + (z - z_{nn})^2} + \delta d, \quad (22)$$

$$\dot{d}_{i\Sigma} = l_d \{ \dot{\mathbf{X}}(t) \} = (K_{xi} + K'_x) V_x + (K_{yi} + K'_y) V_y + (K_{zi} + K'_z) V_z - K_{xi} W_{xi} - K_{yi} W_{yi} - K_{zi} W_{zi}, \quad (23)$$

$$\varphi_{pi} = l_\varphi \{ \mathbf{X}(t) \} = \phi_{pi}, \quad (24)$$

$$\Delta \omega_{pi} = l_{\Delta \omega} \{ \mathbf{X}(t) \} = \Delta \omega_{pi}, \quad (25)$$

где x_i, y_i, z_i – координаты i -го НКА в ГПСК; x_{nn}, y_{nn}, z_{nn} – координаты НПКОИ в ГПСК; $W_{xi}(t), W_{yi}(t), W_{zi}(t)$ – известные на основе обработки навигационных сообщений проекции земных скоростей i -го НКА на оси ГПСК.

В выражении (25) K_{xi}, K_{yi}, K_{zi} и K'_x, K'_y, K'_z – направляющие косинусы, определяемые выражениями

$$K_{xi}(t) = \frac{x(t) - x_i(t)}{d_1(t)}, K_{yi}(t) = \frac{y(t) - y_i(t)}{d_1(t)}, K_{zi}(t) = \frac{z(t) - z_i(t)}{d_1(t)}, \quad (26)$$

$$K'_x(t) = \frac{x(t) - x_{nn}(t)}{d_2(t)}, K'_y(t) = \frac{y(t) - y_{nn}(t)}{d_2(t)}, K'_z(t) = \frac{z(t) - z_{nn}(t)}{d_2(t)}. \quad (27)$$

Значения направляющих косинусов (25), (26) на интервале времени $t \in [t_k, t_k + T]$ можно считать постоянными.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ СИНТЕЗА ОПТИМАЛЬНОГО АЛГОРИТМА КОМПЛЕКСНОЙ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ О ПРОСТРАНСТВЕННОМ ПОЛОЖЕНИИ АРЗ

Уравнение, описывающее динамику изменения компонент вектора состояния, может быть представлено в векторно-матричной форме:

$$\dot{\mathbf{X}}(t) = \mathbf{F}\mathbf{X}(t) + \mathbf{C}\mathbf{U}(t) + \mathbf{G}\mathbf{N}(t), \quad \mathbf{X}(0) = \mathbf{X}_0, \quad (28)$$

где $\mathbf{U}(t) = [W_{xi}(t), W_{yi}(t), W_{zi}(t)]^T$ – вектор управления; $\mathbf{N}(t) = [n_{ax}(t), n_{ay}(t), n_{az}(t), n_{\varphi}(t), n_{\Delta \omega}(t)]^T$ – вектор формирующих БГШ; $\mathbf{F}, \mathbf{C}, \mathbf{G}$ – известные матрицы состояния, управления и возмущения, ненулевые элементы которых имеют вид: $f_{1,4} = f_{2,5} = f_{3,6} = f_{4,7} = f_{5,8} = f_{6,9} = 1$, $f_{7,7} = f_{8,8} = f_{9,9} = -(\rho_1 + \rho_2)$, $f_{10,11} = 1$, $f_{11,11} = -\vartheta_{\omega}$; $c_{10,1} = -K_{xi}$, $c_{10,2} = -K_{yi}$, $c_{10,3} = -K_{zi}$; $g_{7,1} = \sqrt{(\rho_1 + \rho_2)\sigma_{ax}^2}$, $g_{8,2} = \sqrt{(\rho_1 + \rho_2)\sigma_{ay}^2}$, $g_{9,3} = \sqrt{(\rho_1 + \rho_2)\sigma_{az}^2}$, $g_{10,4} = \sqrt{\frac{N_{\varphi}}{2}}$, $g_{11,5} = \sqrt{2\vartheta_{\omega}\sigma_{\omega}^2}$.

В дискретные моменты времени $t_k, k = 0, 1, 2, \dots$, (28) имеет вид

$$\dot{\mathbf{X}}(k) = \mathbf{\Phi}\mathbf{X}(k) + \mathbf{\Psi}\mathbf{U}(k) + \mathbf{\Gamma}\mathbf{N}(k), \quad \mathbf{X}(0) = \mathbf{X}_0, \quad (29)$$

где $\mathbf{\Phi}, \mathbf{\Psi}, \mathbf{\Gamma}$ – известные переходные матрицы состояния, управления и возмущения, определяемые выражениями, приведенными, например, в [1, 3].

Пространственные координаты АРЗ, полученные с помощью АРЛС, из ССК могут быть пересчитаны в ГПСК. Тогда выходные данные АРЛС будут иметь вид

$$\tilde{\mathbf{\Xi}}(k) = \tilde{\mathbf{H}}\tilde{\mathbf{X}}(k) + \tilde{\mathbf{E}}(k), \quad (30)$$

где $\tilde{\mathbf{\Xi}}(k) = [\xi_{ax}(k), \xi_{ay}(k), \xi_{az}(k)]^T$ – вектор наблюдения, компоненты которого представляю собой выходные данные АРЛС в ГПСК; $\tilde{\mathbf{X}}(k) = [x(k), y(k), z(k)]^T$ – вектор истинных значе-

ний координат АРЗ в ГПСК; $\tilde{\mathbf{E}}(k) = [\varepsilon_x(k), \varepsilon_y(k), \varepsilon_z(k)]^T$ – вектор флуктуационных погрешностей измерений АРЛС, компоненты которого описываются рекуррентными выражениями вида:

$$\varepsilon_x(k) = \mu \varepsilon_x(k-1) + \nu n_x(k-1), \quad \varepsilon_x(0) = \varepsilon_{x0}, \quad (31)$$

$$\varepsilon_y(k) = \mu \varepsilon_y(k-1) + \nu n_y(k-1), \quad \varepsilon_y(0) = \varepsilon_{y0}, \quad (32)$$

$$\varepsilon_z(k) = \mu \varepsilon_z(k-1) + \nu n_z(k-1), \quad \varepsilon_z(0) = \varepsilon_{z0}, \quad (33)$$

где $\mu = e^{-\gamma T}$; $\nu = \sqrt{\sigma_\varepsilon^2(1-\mu^2)}$; α – коэффициент, определяющий ширину спектра флуктуаций погрешности; σ_ε^2 – дисперсия флуктуационной погрешности; $n_x(k)$, $n_y(k)$, $n_z(k)$ – формирующие БГШ с нулевыми математическими ожиданиями и единичными дисперсиями.

Вектор наблюдения на интервале времени $t \in [t_k, t_k + T]$ имеет вид

$$\Xi(t) = [\Xi_c(t) \quad \tilde{\Xi}(t)]^T, \quad (34)$$

где $\Xi_c(t) = [\xi_1(t), \xi_2(t), \dots, \xi_l(t)]$ – субвектор наблюдений от всех видимых НКА СНС, определяемый (9).

Таким образом, задача синтеза комплексного оптимального алгоритма обработки информации о пространственном положении АРЗ может быть сформулирована следующим образом: имея наблюдение (34) и располагая априорными сведениями о векторе состояния (29) необходимо получить оптимальную оценку вектора состояния $\mathbf{X}^*(t)$, которая должна удовлетворять критерию минимума апостериорного риска при квадратичной функции потерь:

$$\mathbf{X}^*(t) = \hat{\mathbf{X}}(t) : \min_{\hat{\mathbf{X}}} \left\{ \int c(\mathbf{X}, \hat{\mathbf{X}}) p_{ps}(t, \mathbf{X}) d\mathbf{X} \right\}, \quad (35)$$

где: $c(\mathbf{X}, \hat{\mathbf{X}}) = (\mathbf{X} - \hat{\mathbf{X}})^T \mathbf{B}(\mathbf{X} - \hat{\mathbf{X}})$ – квадратичная функция потерь; $\mathbf{B}$ – заданная неотрицательно определенная матрица; $p_{ps}(t, \mathbf{X}) \stackrel{\Delta}{=} p(t, \mathbf{X} | \Xi_{t_0}^t)$ – апостериорная плотность вероятности $\mathbf{X}(t)$; $\Xi_{t_0}^t = \{\Xi(\tau) : \tau \in [t_0, t]\}$ – реализация вектора наблюдения $\Xi(t)$ на полуинтервале $t \in [t_0, t]$; $\hat{\mathbf{X}}(t)$ – оценка вектора состояния.

Как известно [1], оптимальной оценкой вектора состояния $\mathbf{X}^*(t)$, удовлетворяющей критерию (35), является апостериорное математическое ожидание $M_{ps}\{\mathbf{X}(t)\}$:

$$\mathbf{X}^*(t) = M_{ps}\{\mathbf{X}(t)\} \stackrel{\Delta}{=} \int_{\mathbf{X}} \mathbf{X} p_{ps}(t, \mathbf{X}) d\mathbf{X}. \quad (36)$$

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ярлыков М.С., Миронов М.А. Марковская теория оценивания случайных процессов. М.: Радио и связь, 1993.

2. **Иванов В.Э., Фридзон М.Б., Ессяк С.П.** Радиозондирование атмосферы. Технические и метрологические аспекты разработки и применения радиозондовых измерительных средств. / Под ред. В.Э. Иванова. Екатеринбург, 2004.

3. **Болелов Э.А., Ермошенко Ю.М., Фридзон М.Б.** Повышение надежности системы радиозондирования атмосферы за счет комплексирования методов сопровождения радиозонда в полете // Научный вестник МГТУ ГА. 2015. № 222.

4. **Яценков В.С.** Основы спутниковой навигации. М.: Горячая линия-Телеком, 2005.

5. Информационное сообщение центра глобального мониторинга ЦГМ 2005 г. Временный выход из строя спутника ГЛОНАСС № 22. [Электронный адрес] URL: <http://www.sdcm.ru>.

THE ELABORATION OF THE OPTIMAL SYNTHESIS ALGORITHM FOR COMPLEX PROCESSING INFORMATION OF THE SPATIAL POSITION OF THE UPPER-AIR RADIOSONDE

Bolelov E.A., Ermoshenko Yu.M.

The article considers the elaboration of the problem of optimal algorithm synthesis of complex signal processing of satellite GLONASS/GPS systems navigation relayed from the Board of the upper-air radiosonde and the output data upper-air radar to determine the spatial coordinates of upper-air radiosonde. The upper-air sounding is performed with the help of technical means of radio sounding system of atmosphere, including the upper-air radiosonde, manufactured in free flight, and ground supporting equipment, which includes devices for signal processing of upper-air radiosonde and preparation of the operational upper-air messages. The peculiarity of atmosphere radio sounding of domestic system is the measurement with method of radar slant range to upper-air radiosonde, the viewing angles of the antenna upper-air radar to determine azimuth and elevation of upper-air radiosonde. The disadvantage of the radar method of radiosonde support is the relatively low accuracy of determining the coordinates of the radiosonde and the possible disruption of automatic tracking in angular coordinates. Satellite navigation system based on the microwave sensors has clear advantages in terms of efficiency, size, mobility, and use on mobile objects, however, with significant drawbacks associated primarily with the geometric factor and the error propagation of the navigation signal. The article presents a mathematical model useful incoherent GLONASS/GPS signals, relayed by the upper-air radiosonde, and interference on the input receiver ground point for complex information processing, and mathematical models of output data in upper-air radars.

Key words: the Stratonovich equation, the a posteriori probability density, the upper-air radiosonde, an integrated optimal algorithm, the system of radio sounding of atmosphere, aerological radar.

REFERENCES

1. **Yarlykov M.S., Mironov M.A.** Markov theory of estimating random processes. Moscow, Radio and communication, 1993.

2. **Ivanov V.E., Fridzon M.B., Essack S.P.** Sounding of the atmosphere. Technical and metrological aspects of the development and application of radiosonde measuring means. Ed. by V.E. Ivanov. Ekaterinburg, 2004.

3. **Bolelov E.A., Ermoshenko Yu.M., Fridzon M.B.** Improving the reliability of the system of radio sounding of atmosphere by aggregation methods for tracking of the radiosonde in flight. The MSTUCA Scientific Bulletin. 2015. Issue 222.

4. **Yazenkov V.S.** Fundamentals of satellite navigation. Moscow, Hot line-Telecom, 2005.

5. The information message center global monitoring CGM 2005 Temporary failure of the GLONASS satellite No. 22. <http://www.sdcm.ru>.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Болелов Эдуард Анатольевич, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой технической эксплуатации радиоэлектронного оборудования воздушных судов МГТУ ГА, электронный адрес: e.bolelov@mstuca.aero.

Ермошенко Юлия Марковна, заместитель генерального директора по технике и юридическому сопровождению производства ООО «Аэроприбор», электронный адрес: meteoru@yandex.ru.