

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СУБОПТИМАЛЬНЫХ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ ПРИЕМА И ЦИФРОВОЙ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ НА ОСНОВЕ СТАТИСТИЧЕСКИ ЭКВИВАЛЕНТНЫХ ФИЛЬТРОВ

Ярлыков М. С., Пригонюк Н. Д.

ВВИА им. Н.Е. Жуковского

Методами марковской теории оптимального оценивания случайных процессов были решены многие задачи синтеза радиоэлектронных систем (РЭС) приема и цифровой обработки сигналов. Для обоснованного принятия решения о целесообразности практического использования и сравнительной оценки синтезированных алгоритмов приема и цифровой обработки сигналов важной составной частью исследований является количественный расчет фактически достижимых характеристик точности и помехоустойчивости таких систем. С учетом сложности взаимных связей и требуемой детальности описания физических процессов, протекающих в РЭС, исследование фактических характеристик их качества функционирования может быть выполнено путем компьютерного моделирования синтезированных алгоритмов на основе статистических эквивалентных фильтров, которые позволяют осуществить статистическое моделирование сигналов на выходах многомерных дискриминаторов (МД) [1, 2]. Такой подход дает возможность избежать неоправданной сложности статистического моделирования алгоритмов на несущей частоте радиосигналов с одной стороны, а с другой стороны, не ведет к слишком большим упрощениям, как это бывает при численных методах решения дифференциальных или рекуррентных уравнений для матриц апостериорных моментов второго порядка, позволяющих получить лишь потенциальные характеристики точности и помехоустойчивости РЭС.

Как известно, сигнал на выходе оптимального дискриминатора (ОД) на интервалах времени (t_k, t_{k+1}) , $k = 0, 1, 2, \dots$, определяется выражением вида [1, 2]

$$\Phi'(t_k + T) = \left[\frac{\partial \Phi(\mathbf{Y}_k^*)}{\partial \mathbf{Y}_k^*} \right]^T = \int_{t_k}^{t_{k+1}} \left[\frac{\partial F(\tau, \mathbf{Y}_k^*)}{\partial \mathbf{Y}_k^*} \right]^T d\tau, \quad (1)$$

где $T = t_{k+1} - t_k$, $\Phi(\mathbf{Y}_k^*)$ - логарифм функционала правдоподобия (ЛФП); \mathbf{Y}_k^* - оценочное значение вектора параметров радиосигнала (ПРС), от которых он непосредственно зависит; $F(\tau, \mathbf{Y}_k^*)$ - скалярная функция, представляющая собой производную по времени от ЛФП; T - символ транспонирования.

Статистически эквивалентное представление первой производной от ЛФП с учетом того, что $\Phi(t_k + T) = \Phi_s(t_k + T) + \Phi_n(t_k + T)$, имеет вид [1, 2]

$$\Phi'(t_k + T) \approx \mathbf{Z}(t_{k+1}, \mathbf{E}(t_k)) + \Gamma_1 \mathbf{N}_{1k}, \quad t \in (t_k, t_{k+1}), \quad (2)$$

где $\mathbf{Z}(t_{k+1}, \mathbf{E}(t_k)) = \Phi'_s(t_k + t)$ - многомерная дискриминационная характеристика ОД, которую можно рассматривать как первую производную от составляющей ЛФП $\Phi'_s(t_k + t)$;

$\mathbf{E}(t_k) = \mathbf{Y}(t_k) - \mathbf{Y}^*(t_k)$ - вектор ошибок оценивания вектора ПРС; Γ_1 - нижняя треугольная матрица, связанная с первой производной от флуктуационной составляющей ЛФП $\Phi'_n(t_k + T)$

соотношениями: $\Gamma_1 \Gamma_1^T = \mathbf{D}_1(t_k + T)$, $\mathbf{D}_1(t_k + T) = \mathbf{M} \left\{ \Phi'_n(t_{k+1}) \Phi_n^T(t_{k+1}) \right\}$; \mathbf{N}_{1k} - вектор-столбец независимых гауссовских случайных величин с нулевыми математическими ожиданиями (МО) и единичными дисперсиями.

Аналогичное статистически эквивалентное представление имеет место и для второй производной от ЛФП

$$\Phi''(t_k + T) = \frac{\partial^2 \Phi(\mathbf{Y}_k^*)}{\partial \mathbf{Y}_k^{*2}} = \int_{t_k}^{t_{k+1}} \left[\frac{\partial}{\partial \mathbf{Y}_k^*} \right]^T \left[\frac{\partial F(\tau, \mathbf{Y}_k^*)}{\partial \mathbf{Y}_k^*} \right] d\tau, \quad (3)$$

которое описывает текущее значение крутизны ДХ и соответственно значения оптимальных коэффициентов передачи РЭС с учетом шумов наблюдения.

Далее для определенности рассуждений при компьютерном моделировании РЭС на основе изложенного подхода в качестве примера имеющего самостоятельное научно-прикладное значение, рассматриваем бортовой спутниковый навигационно-посадочный комплекс (СНПК), предназначенный в своей основе для навигации и посадки самолетов по сигналам среднеорбитальных спутниковых радионавигационных систем (СРНС) типов ГЛОНАСС и GPS [4].

Совокупность случайных процессов, наблюдаемых на входах СНПК от радиотехнических и нерадиотехнических измерителей, представим в виде вектор-столбца [3]

$$\Xi(t) = [\Xi_s^T(t), \xi_r(t), \mathbf{Z}_{in}^T(t), Z_b(t)]^T, \quad t \in [t_k, t_{k+1}), \quad k = 0, 1, 2, \dots, \quad (4)$$

где $\Xi_s^T(t) = [\xi_1(t), \dots, \xi_I(t)]$ - субвектор наблюдений от всех видимых навигационных космических аппаратов (НКА) систем ГЛОНАСС и GPS на входе аппаратуры потребителей (АП) СРНС; $\xi_r(t)$ - наблюдение на входе бортового радиовысотомера (РВ); $\mathbf{Z}_{in}(t)$ - субвектор наблюдений от инерциальной навигационной системы (ИНС); $Z_b(t)$ - наблюдение с выхода баровысотомера (БВ).

Решение задачи синтеза основано на применении методов поэтапного решения уравнения Стратоновича и гауссовской аппроксимации апостериорной плотности вероятности (АПВ). Кроме того, при синтезе алгоритмов комплексной обработки информации (КОИ) в СНПК используется подход, в соответствии с которым ОД каждого приемника сигналов СРНС и РВ разрабатывается применительно к своему частному пространству состояний, определяемому векторами ПРС $\mathbf{Y}_i(t)$, где $i = \overline{1, I}$, и $\mathbf{Y}_r(t)$. В то же время естественным образом учитываются все функциональные связи \mathbf{L}_i и \mathbf{L}_r между векторами ПРС и общим вектором состояния $\mathbf{X}(t)$, что позволяет сформировать алгоритмы КОИ со структурно раздельной первичной обработкой сигналов, облегчающей практическую реализацию СНПК.

Согласно изложенной процедуре оптимальные оценки каждого из векторов ПРС \mathbf{Y}_{ik}^* и \mathbf{Y}_{rk}^* , можно представить в виде [3]

$$\mathbf{Y}_{ir}^*(t_k | t_k + T) = \mathbf{Y}_{ir}^* - \mathbf{R}(t_k | t_k + T) \Phi_s''(t_k + T) \mathbf{E}_k + \mathbf{R}(t_k | t_k + T) \Phi_n'(t_k + T), \quad (5)$$

где $\mathbf{E}_k = \mathbf{L}_{i(r)}(\mathbf{X}_k) - \mathbf{L}_{i(r)}(\mathbf{X}_k^*)$ - вектор ошибок оценивания компонент соответствующих векторов ПРС; $\Phi_s''(t_k + T)$ и $\Phi_n'(t_k + T)$ - сигнальная и шумовая составляющие ЛФП; $\mathbf{R}(t_k | t_k + T)$ - матрица центральных моментов второго порядка ошибок фильтрации компонент векторов $\mathbf{Y}_{ir}(t_k)$.

Тогда алгоритм оптимального дискретного оценивания вектора состояния \mathbf{X}_{k+1} по наблюдениям, шумы которых являются частично окрашенными, имеет вид [1, 3]

$$\mathbf{X}_{k+1}^* = \mathbf{X}_3 + \mathbf{K}_{k+1} \begin{bmatrix} \Phi'(t_k + T) \\ \Xi_{nra}(k+1) - \mathbf{H}_{k+1} \mathbf{X}_3 - \Phi_{Ex} \mathbf{X}_k^* - \Phi_{EE} [\Xi_{nra}(k) - \mathbf{H}_k \mathbf{X}_k^*] \end{bmatrix} = \quad (6)$$

$$= \mathbf{X}_3 + \mathbf{K}_{k+1} \mathbf{Z}_{k+1},$$

где $\mathbf{X}_3 = \Phi_{xx} \mathbf{X}_k^* + \Psi \mathbf{U}_k$ - экстраполированная оценка вектора состояния на момент времени t_{k+1} ; $\Phi'(t_k + T) = [\Phi'_{s1}(t_k + T), \dots, \Phi'_{sI}(t_k + T), \Phi'_r(t_k + T)]^T$ - значения первых производных ЛФП; $\Xi_{nra}(t_{k+1}) = [\mathbf{Z}_{in}^T(t_{k+1}), Z_b(t_{k+1})]^T$ - субвектор наблюдений нерадиотехнических измерителей; \mathbf{K}_{k+1} - матрица оптимальных коэффициентов передачи; \mathbf{Z}_{k+1} - вектор невязок измерений.

Выражения (5) и (6) позволяют получить соответствующую структурную схему СНПК на основе СРНС с использованием информации от ИНС, РВ и БВ, которая приведена на рис. 1.

Основная трудность практического применения метода статистического компьютерного моделирования заключается в необходимости разработки статистической математической модели

(ММ) выходных процессов бортового СНПК, которая достаточно корректно и адекватно должна учитывать условия функционирования реального комплекса. Поэтому, целесообразно сделать упрощение, которое применительно к одномерному дискриминатору заключается в замене его на статистически эквивалентный фильтр.

На основе разработанной ММ выполним расчет фактически достижимых характеристик качества функционирования бортового СНПК. Для количественной оценки качества функционирования синтезированной системы по полученным реализациям компонент вектора ошибок \mathbf{E}_d были вычислены текущие значения МО и среднеквадратической ошибки (СКО) основных навигационных параметров.

В качестве характеристик качества функционирования бортового СНПК принято:

– точность определения основных навигационных параметров, которая характеризуется СКО определения этих параметров;

– помехоустойчивость СНПК, которая характеризуется отношением сигнал/шум

$q_i = 2A_i^2 \tau_{im} / N_i$, при котором еще осуществляется слежение за параметрами радиосигнала СРНС с требуемой точностью.

Исследование основных характеристик качества функционирования СНПК проводилось для различных вариантов его конфигурации применительно к случаю определения пространственных координат и высоты самолета в гринвичской СК. В качестве исходных данных использовались типовые значения параметров авиационных СРНС, ИНС, РВ и БВ. Некоторые результаты компьютерного моделирования, выполненного в соответствии с предложенной ММ синтезированной системы приема и КОИ СНПК, приведены на рис. 2 - 4.

Результаты вычисления СКО оценивания координаты X ЛА σ_{ε_x} от времени, проведенные для трех вариантов используемого созвездия НКА и разного состава СНПК, представлены на рис. 2. Кривые под номером 1 соответствуют случаю использования сигналов от четырех НКА СРНС ГЛОНАСС; кривые под номером 2 - от четырех НКА СРНС ГЛОНАСС и ИНС, а кривые под номером 3 - от четырех НКА СРНС ГЛОНАСС, четырех НКА СРНС GPS и ИНС. Приведенные кривые на этих рисунках характеризуют штатное функционирование СРНС ГЛОНАСС и GPS ($q_i = 10^{-3}$).

Отношение сигнал/шум для РВ при этом было типовым и принималось равным $q_r = 2$.

На рис. 3 применительно к полному составу СНПК представлены зависимости СКО измерения истинной высоты h ЛА σ_{ε_h} от времени для различных значений отношений сигнал/шум на входе приемника РВ ($q_r = 10$, $q_r = 2$, $q_r = 0,2$ - кривые 1,2 и 3 соответственно).

На рис. 4 изображены зависимости установившихся значений величин $\sigma_{\varepsilon_{хуст}}$ от отношения сигнал/шум в каналах СРНС (q_i) для четырех НКА ГЛОНАСС (кривые 1); четырех НКА ГЛОНАСС + ИНС (кривые 2), и для восьми НКА + ИНС (кривые 3), которые в определенной мере характеризуют помехоустойчивость.

Результаты компьютерного моделирования ошибок оценивания на выходе МД системы КОИ для различных вариантов конфигурации структуры СНПК показывают, что те системы, в которых для определения навигационных параметров ЛА используются дополнительные (избыточные) наблюдения, оказываются более устойчивыми к изменению помеховой обстановки. Более высокая помехоустойчивость систем КОИ, построенных на основе использования информационной избыточности, является существенным фактором повышения достоверности и надежности навигационного обеспечения ЛА.

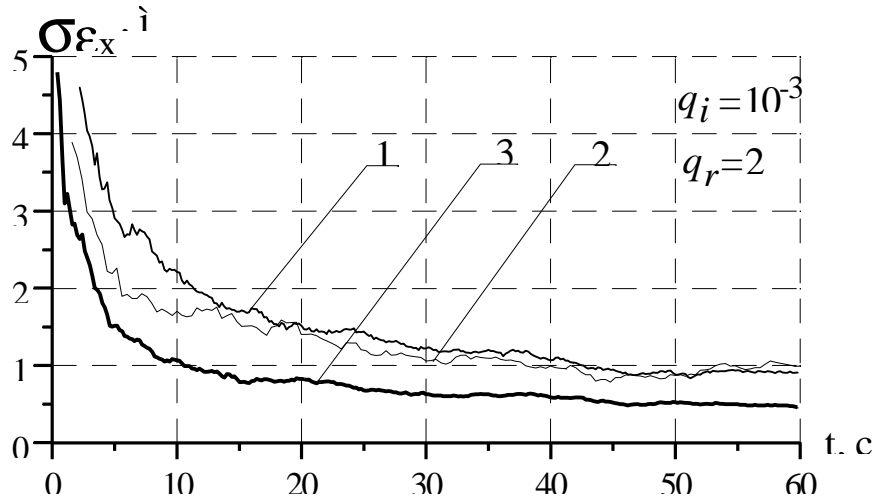


Рис. 2



Рис. 3

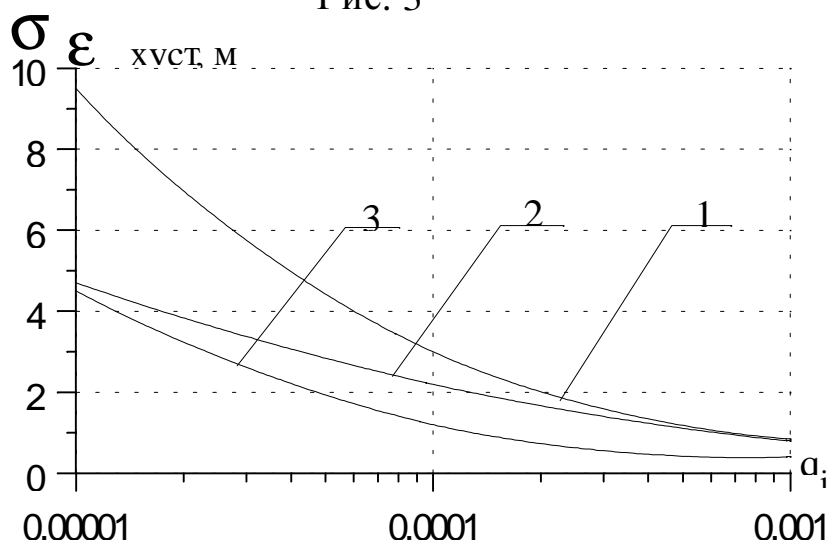


Рис. 4

Литература

1. Ярлыков М.С., Миронов М.А. Марковская теория оценивания случайных процессов. - М.: Радио и связь, 1993.
2. Ярлыков М.С. Статистическая теория радионавигации - М.: Радио и связь, 1985.
3. Ярлыков М.С., Пригонюк Н.Д. Заход на посадку и посадка самолетов по сигналам спутниковых радионавигационных систем.- Радиотехника, 2001, № 1.
4. Болдин В.А., Зубинский В.И., Зурабов Ю.Г. и др. Глобальная спутниковая радионавигационная система ГЛОНАСС. - М.: ИПРЖР, 1998.

