

УДК 621.396

**УЛУЧШЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КАНАЛОВ ПЕРЕДАЧИ НАВИГАЦИОННЫХ ДАННЫХ ПРИ УПРАВЛЕНИИ ВОЗДУШНЫМ ДВИЖЕНИЕМ С АВТОМАТИЧЕСКИМ ЗАВИСИМЫМ НАБЛЮДЕНИЕМ И НАВИГАЦИОННЫХ ПОПРАВК В ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ ПОДСИСТЕМЕ СПУТНИКОВОЙ РАДИОНАВИГАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ ПУТЕМ ИХ НАВИГАЦИОННОЙ ПОДДЕРЖКИ**

<sup>1</sup>Евтушенко О.А., <sup>2</sup>Затучный Д.А.

<sup>1</sup>Филиал «НИИ Аэронавигация» ФГУП ГосНИИ ГА;

<sup>2</sup>Московский государственный технический университет гражданской авиации, Москва, e-mail: zatuch@mail.ru

Рассматривается метод улучшения характеристик каналов передачи данных при управлении воздушным движением с автоматическим зависимым наблюдением путем комплексирования навигационного и связного каналов. Рассматривается случай бинарного фазоманипулированного сигнала, обеспечивающего наиболее высокую помехоустойчивость канала связи. Предложены квазиоптимальные алгоритмы фильтрации дискретно-непрерывных параметров. Получена оценка дискретного параметра на тактовом интервале. Проведен сравнительный анализ алгоритмов путем их стохастического моделирования на ЭВМ. Найдены зависимости вероятности ошибочного приема дискретного сигнала от отношения сигнал/шум на тактовом интервале. Приведены зависимости от выигрыша в дисперсии оценки непрерывных параметров при переходе от некомплексированной к комплексированной системе. Приведены зависимости дисперсии оценки частоты от времени для комплексированной и некомплексированной систем. Сделан вывод, что поскольку частота и задержка сигнала к началу сеанса связи известны с достаточной точностью на основании данных, получаемых с выхода АП СРНС, в канале синхронизации возможно исключение режима поиска сигнала.

**Ключевые слова:** спутниковая радионавигационная система, передача данных, дифференциальная подсистема, навигационная поддержка, система обмена данными

**IMPROVEMENT OF THE CHARACTERISTIC OF CHANNELS OF TRANSFER OF NAVIGATION DATA AT AIR TRAFFIC CONTROL WITH AUTOMATIC DEPENDENT SUPERVISION AND NAVIGATION AMENDMENTS TO THE DIFFERENTIAL SUBSYSTEM OF SATELLITE RADIONAVIGATION SYSTEM BY THEIR NAVIGATION SUPPORT**

<sup>1</sup>Evtushenko O.A., <sup>2</sup>Zatuchnyy D.A.

<sup>1</sup>Branch «Science Search Institute Navigation for aviation» Federal State United Undertaking;

<sup>2</sup>State Science Search Institute Civil Aviation, Moscow state technical university of civil aviation, Moscow, e-mail: zatuch@mail.ru

The method of improvement of characteristics of data links at management of air traffic with automatic dependent supervision by a kompleksirovaniye of navigation and coherent channels is considered. The case of the binary manipulation of signal providing the highest noise stability of a communication channel is considered. Quasioptimum algorithms of a filtration of discrete and continuous parameters are offered. The assessment of discrete parameter on a clock interval is received. The comparative analysis of algorithms by their stochastic modeling on the computer is carried out. Dependences of probability of wrong reception of a discrete signal on the relation signal/noise on a clock interval are found. Dependences on a prize are given in dispersion of an assessment of continuous parameters upon transition from nekompleksirovanny to kompleksirovanny system. Dependences of dispersion of an assessment of frequency on time for kompleksirovanny and nekompleksirovanny systems are given. The conclusion is drawn that as the frequency and a delay of a signal to the beginning of a communication session are known with a sufficient accuracy on the basis of the data obtained from AP SRNS exit in the channel of synchronization the exception of the mode of search of a signal is possible.

**Keywords:** satellite radio navigational system, data transmission, differential subsystem, navigation support, system of data exchange

Физической предпосылкой к улучшению характеристик системы обмена данными (СОД), осуществляющей при управлении воздушным движением (УВД) с автоматическим зависимым наблюдением (АЗН) передачу навигационных данных с борта ВС в дифференциальную подсистему (ДП) и корректирующей информации при дифференциальном

режиме работы аппаратуры потребителей спутниковой радионавигационной системы (АП СРНС), путем комплексирования радиоприемных устройств (РПУ) СОД и АП СРНС, является наличие функционально связанных параметров связных и навигационных сигналов и информационная избыточность навигационных измерений.

Уравнения наблюдения на связном и навигационном входах комплексированного РПУ, соответственно, записываются:

$$\xi_1(t) = s_1(t, \lambda, \theta) + n_1(t); \quad (1)$$

$$\xi_2(t) = s_2(t, \lambda) + u(t). \quad (2)$$

Здесь  $s_1(t, \lambda, \theta)$  – связной сигнал, зависящий как от вектора непрерывных параметров  $\lambda$ , так и от дискретного параметра  $\theta$ , несущего информацию о передаваемом сообщении.

Рассмотрим случай использования бинарного фазоманипулированного сигнала (ФМ-2), обеспечивающего, как известно, наиболее высокую помехоустойчивость канала связи. При этом он запишется как

$$s_1(t, \lambda, \theta) = U_0 f(t - \tau) \theta(t - \tau) \cos(\omega_0 t + \varphi), \quad (3)$$

где  $U_0$  – амплитуда сигнала,  $f(t - \tau)$  и  $\theta(t - \tau)$  – псевдослучайные последовательности (ПСП) и символы модуляции сигнала данными передаваемого сообщения, а вектор непрерывных параметров  $\lambda$  включает в себя случайные фазу  $\varphi$ , задержку  $\tau$  и доплеровскую частоту  $\omega$  сигнала. Поступающий с выхода АП СРНС сигнал  $s_2(t, \lambda)$  содержит укороченный вектор непрерывных параметров

$$\lambda = \begin{bmatrix} \tau \\ \omega \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D/c \\ V\omega_0/c \end{bmatrix}, \quad (4)$$

где  $D$  – расстояние между РПУ и радиопередающим устройством (РПДУ);  $V$  – радиальная скорость ВС;  $\omega_0$  – несущая частота сигнала;  $c$  – скорость распространения радиоволн.

Шум наблюдения в связном канале  $n_1(t)$  полагаем белым гауссовым с нулевым математическим ожиданием и спектральной плотностью  $N_1/2$ , а шум наблюдения в навигационном канале  $u(t)$  – окрашенным. Процессы  $\lambda(t)$  и  $u(t)$  полагаем марковскими, описываемыми стохастическими дифференциальными уравнениями, которые могут быть представлены в виде

$$\dot{\lambda} = A_\lambda \cdot \lambda + G_\lambda \cdot n_1; \quad (5)$$

$$\dot{u} = A_u \cdot u + G_u \cdot n_u, \quad (6)$$

где

$$\lambda = \begin{bmatrix} \varphi \\ \tau \\ \omega \end{bmatrix};$$

$$A_\lambda = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & -1/\omega_0 \\ 0 & 0 & -\gamma_1 \end{bmatrix};$$

$$G_\lambda = \begin{bmatrix} \sqrt{N_0/2} & 0 & 0 \\ 0 & \sqrt{N_\tau/2} & 0 \\ 0 & 0 & \sqrt{N_\omega/2} \end{bmatrix};$$

$$u = \begin{bmatrix} u_\tau \\ u_\omega \end{bmatrix};$$

$$A_u = \begin{bmatrix} -\gamma_2 & 0 \\ 0 & -\gamma_3 \end{bmatrix};$$

$$G_u = \begin{bmatrix} \sqrt{N_2/2} & 0 \\ 0 & \sqrt{N_3/2} \end{bmatrix},$$

где  $\gamma_i$  и  $N_i$  – соответствующие коэффициенты сноса и спектральные плотности.

Априорные уравнения (5), (6) и уравнения наблюдения (1), (2) позволяют с использованием марковской теории оптимальной нелинейной фильтрации (ОНФ) синтезировать квазиоптимальные алгоритмы комплексной обработки дискретно-непрерывной информации системы связи совместно с выходными сигналами АП СРНС [2, 3], а затем с помощью стохастического моделирования на ЭВМ получить точностные и динамические характеристики синтезированной системы и сравнить их с аналогичными характеристиками некомплексированной системы.

В рамках гауссовой аппроксимации апостериорной плотности вероятностей вектора непрерывных параметров  $\lambda$  [4], позволяющей перейти к приближенным соотношениям для математического ожидания  $\lambda$  и вторых центральных моментов  $R$  аппроксимирующего гауссова распределения, квазиоптимальные алгоритмы фильтрации дискретно-непрерывных параметров имеют вид [5]

$$\dot{\lambda}^* = A + R \left[ \frac{dF}{d\lambda} \right]; \quad (7)$$

$$\dot{R} = R + \frac{dA}{d\lambda} \cdot R + R \cdot \left[ \frac{dA}{d\lambda} \right]^T + R \cdot \frac{d^2 F}{d\lambda^2}. \quad (8)$$

Коэффициенты этих уравнений в случае, когда одна часть наблюдений проводится на фоне белых, а другая часть – на фоне окрашенных шумов наблюдения, определяются соотношениями [1]

$$A = A_\lambda \cdot \lambda^* + B_{12} \cdot B_{22}^{-1} [\dot{\xi}_2 - A_2]; \quad (9)$$

$$F = A_1^T \cdot B_{11}^{-1} \cdot [\dot{\xi}_1 - A_2 / 2] + A_2^T \cdot B_{22}^{-1} [\dot{\xi}_2 - A_2 / 2]; \quad (10)$$

$$B = B_{33} - B_{12} \cdot B_{22}^{-1} \cdot B_{12}^T, \quad (11)$$

где

$$A_1 = S_1;$$

$$A_2 = \dot{\lambda} + \frac{dS_2}{d\lambda} \cdot A_\lambda \cdot \lambda - A_u [\xi_2 - S_2];$$

$$B_{11} = N_1 / 2; \quad B_{12} = G_\lambda \cdot G_\lambda^T \left[ \frac{dS_2}{d\lambda} \right]^T;$$

$$B_{22} = \frac{dS_2}{d\lambda} G_\lambda \cdot G_\lambda^T \left[ \frac{dS_2}{d\lambda} \right]^T + G_u \cdot G_u^T;$$

$$B_{33} = G_\lambda \cdot G_\lambda^T.$$

При этом уравнение для вычисления вектора оценок имеет вид

$$\begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\tau} \\ \dot{\omega} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \omega^* \\ -\frac{\omega^*}{\omega_o} + N_\tau F_{2\tau} \\ -\alpha_1 \omega^* + N_\omega F_{2\omega} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} F_{1\phi} \cdot thz \\ F_{1\tau} \cdot thz + 2\alpha_2 F_{2\tau} \\ F_{2\tau} \frac{2}{\omega_o} + 2(\alpha_3 - \alpha_1) F_{2\omega} \end{bmatrix}, \quad (12)$$

где

$$F_{1\phi} = -\frac{2A_o}{N_1} \xi_1 g(t - \tau^*) \sin(\omega_o t + \phi^*);$$

$$F_{1\tau} = \frac{2A_o}{N_1} \xi_1 \frac{dg(t - \tau^*)}{d\tau} \cos(\omega_o t + \phi^*);$$

$$F_{2\tau} = \frac{1}{N_\tau + N_2} \left[ \dot{\xi}_\tau + \frac{\omega^*}{\omega_o} + \alpha_2 (\xi_\tau - \tau^*) \right];$$

$$F_{2\omega} = \frac{1}{N_\omega + N_3} \left[ \dot{\xi}_\omega + \alpha_1 \omega^* + \alpha_3 (\xi_\omega - \omega^*) \right],$$

$$z = \int_{t_k + \tau^*}^{t_{k+1} + \tau^*} \xi_1 g(t - \tau^*) \cos(\omega_o t + \phi^*) dt.$$

Оценка дискретного параметра  $\theta$  на  $k$ -м тактовом интервале производится в соответствии с алгоритмом:  $z >_< 0$ . Отличие комплексированного алгоритма от некомплексированного заключается в том, что для последнего в уравнении (12) следует положить  $F_{2\tau} = F_{2\omega} = 0$ .

Был проведен сравнительный анализ этих алгоритмов путем их стохастического моделирования на ЭВМ. На рис. 1 приведены зависимости вероятности ошибочного приема дискретного параметра  $\theta$ , которая определялась как зависимость относительной частоты несовпадений оценочных значений  $\theta^*$  с истинными значениями от отношения сигнал/шум на тактовом интервале  $q = A_o T_o / N_1$ .

Как видим, при большом значении  $q$  обе кривые мало различимы, а при приближении к пороговому значению  $q$  вероятность ошибочного приема в комплексированной системе (кривая 1) значительно меньше, чем в некомплексированной (кривая 2), что может быть объяснено проявлением эффекта «перескоков фаз», связанного с полимодальностью апостериорного распределения фазы.

На рис. 2 приведены зависимости от  $q$  выигрыша в дисперсии оценки  $\delta_i = \sigma_{i \text{ некомпл}}^2 / \sigma_{i \text{ компл}}^2$  непрерывных параметров  $\phi, \tau, \omega$  при переходе от некомплексированной к комплексированной системе.

Из анализа этих зависимостей видно, что выигрыш существенен, особенно при приближении к пороговому значению  $q$ .

На рис. 3 приведены зависимости дисперсии оценки частоты от времени  $\sigma_\omega^2(t) / \sigma_\omega^2(0)$  для комплексированной (кривая 1) и некомплексированной (кривая 2) систем.

Как видно из этих зависимостей, комплексирование существенно улучшает динамические характеристики системы.

Таким образом, использование навигационной поддержки от АП СРНС позволяет существенно повысить достоверность передачи данных по каналу связи. При этом улучшение точностных и динамических характеристик систем слежения за непрерывными параметрами связного сигнала свидетельствует об улучшении указанных характеристик системы синхронизации СОД. Причем, поскольку частота и задержка сигнала  $s_1(t, \lambda, \theta)$  к началу сеанса связи известны с достаточной точностью на основании данных, получаемых с выхода АП СРНС, в канале синхронизации возможно исключение режима поиска сигнала.

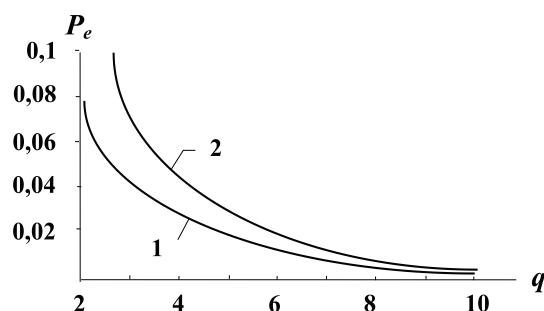


Рис. 1. Зависимость вероятности ошибки от отношения сигнал/шум для комплексированной (кривая 1) и некомплексированной (кривая 2) систем

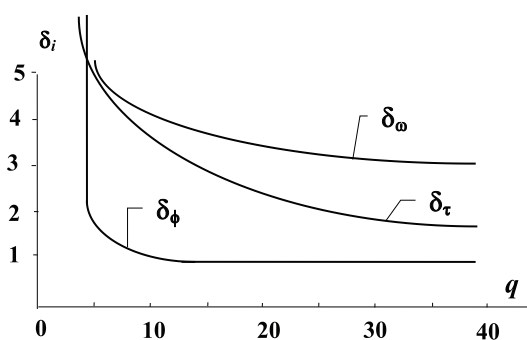


Рис. 2. Зависимость выигрыша дисперсии оценки непрерывных параметров от отношения сигнал/шум

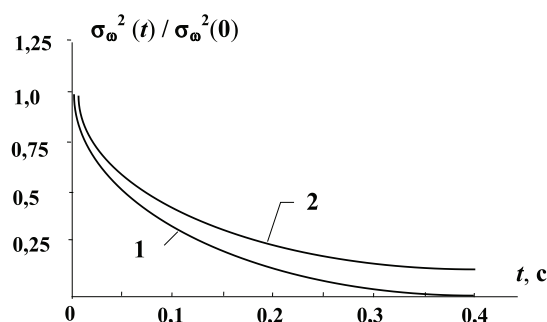


Рис. 3. Зависимость дисперсии оценки частоты от времени в комплексированной и некомплексированной системах

### Список литературы

1. Журавлев В.И. Поиск и синхронизация в широкополосных системах. – М.: Радио и связь, 1986.
2. Затучный Д.А. Вероятность ошибки при передаче информации по цифровому каналу связи. – Научный Вестник МГТУ ГА, серия «Радиофизика и радиотехника». – 2007. – № 112. – С. 102–105.
3. Затучный Д.А. Метод передачи данных с борта воздушного судна в городских районах в режиме автоматического зависящего наблюдения с целью снижения эффекта отражения волн // Научный Вестник МГТУ ГА. – 2012. – № 176. – С. 145–148.
4. Логвин А.И., Лутин Э.А. Радиолокационные характеристики при флуктуациях угла ориентации плоскополяризованной электромагнитной волны // Научный Вестник МГТУ ГА. – 2014. – № 210. – С. 47–48.
5. Ярлыков И.С. Статистическая теория радионавигации. – М.: Радио и связь, 1985.

### References

1. Zhuravlev V.I. Poisk i sinkhronizatsiya v shirokopolosnykh sistemakh. M.: Radio i svyaz, 1986.
2. Zatchunny D.A. Veroyatnost oshibki pri peredache informatsii po tsifrovomu kanalu svyazi. Nauchnyy Vestnik MGTU GA, seriya «Radiofizika i radiotekhnika», no. 112, 2007, pp. 102–105.

3. Zatchunny D.A. Metod peredachi dannykh s borta vozdushnogo sudna v gorodskikh rayonakh v rezhime avtomaticheskogo zavisimogo nabludeniya s tselu snizheniya effekta otrazheniya voln. Nauchnyy Vestnik MGTU GA, no. 176, 2012, pp. 145–148.

4. Logvin A.I., Lutin E.A. Radiolokatsionnye kharakteristiki pri fluktuatsiyakh ugla orientatsii ploskopolyarizovannoy elektromagnitnoy volny. Nauchnyy Vestnik MGTU GA, no. 210, 2014, pp. 47–48.

5. Yarlykov I.S. Statisticheskaya teoriya radionavigatsii. M.: Radio i svyaz, 1983.

### Рецензенты:

Козлов А.И., д.ф.-м.н., профессор, «Техническая эксплуатация радиоэлектронного оборудования воздушного транспорта», Московский государственный технический университет гражданской авиации, г. Москва;

Акиншин Р.Н., д.т.н., доцент, ведущий научный сотрудник секции по оборонным проблемам Министерства обороны (при Президиуме Российской академии наук), г. Москва.