Синтез устройств фильтрации помех в тракте навигационного приемника спутниковых радионавигационных систем

Synthesis of equalizating canal of similar to signals noise within search and detection of navigating signals in apparatus of global navigation satellite systems users

Миронов / Mironov V.

Владимир Александрович (mirvam@live.ru) доктор технических наук, профессор. ФГКВОУ ВО «Военный учебно-научный центр (ВУНЦ) Военно-воздушных сил (ВВС) «Военно-воздушная академия (ВВА) имени профессора Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина», главный научный сотрудник.

г. Воронеж

Неровный / Nerovny V.

Валерий Владимирович (val.nerownoyj@yandex.ru) кандидат технических наук. ВУНЦ ВВС ВВА им. профессора Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина, доцент.

г. Воронеж

Ключевые слова: помехи – noise; канал компенсации – equalization canal; навигационный сигнал – navigating signal; канал поиска и обнаружения – search and detection canal.

Проведен синтез канала компенсации помех при поиске навигационных сигналов в аппаратуре потребителей глобальных навигационных спутниковых систем. Разработана математическая модель обнаружителя навигационного сигнала с каналом компенсации сигналоподобных помех, произведена оценка эффективности его функционирования при поиске навигационных сигналов.

Synthesis of equalization canal has been carried out within search of navigating signals in apparatus of Global Navigation Satellite Systems users. The simulator of navigation signal with canal of similar to signals noise detector has been worked out. The efficiency of his operating benefits within search and detection of navigating signals has been assessed.

Введение

В последнее время возросла роль аппаратуры потребителей глобальных навигационных спутниковых систем (АП ГНСС). Повышаются требования к точности навигационно-временных определений.

Коратаев / Korataev P.

Павел Дмитриевич (korataev2015@mail.ru) кандидат технических наук. ВУНЦ ВВС ВВА им. профессора Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина, преподаватель. г. Воронеж

Тимошенко / Timoshenko A.

Александр Васильевич (u567ku78@gmail.com) доктор технических наук, профессор. АО «РТИ», руководитель проектов. г. Москва

Наряду с этим функционирование навигационных приемников спутниковых радионавигационных систем осуществляется в условиях помех. Возникает необходимость снижения влияния помех на АП ГНСС.

С точки зрения функционирования АП ГНСС в условиях воздействия помех различают два режима: поиск навигационного сигнала, слежение за сигналом.

Способы борьбы с помехами в режиме слежения за навигационным сигналом исследованы достаточно полно и представлены в литературе [1, 2]. Способы борьбы с помехами в АП ГНСС, функционирующей в режиме поиска и обнаружения навигационного сигнала, освещены недостаточно и требуют дополнительных исследований.

Одним из возможных способов борьбы с помехами в режиме поиска навигационных сигналов АП ГНСС может, является принцип компенсации.

Принцип компенсации помех наиболее четко был сформулирован в [3] и основывался на двухканальном методе приема, когда в основном канале присутствуют полезный сигнал и помеха, в компенсирующем канале – помеха, а сигнал существенно ослаблен. Сложение в противофазе сигналов основного и компенсирующего каналов приводит к снижению уровня помехи без существенного ослабления сигнала. Такой подход к подавлению помех дал хорошие результаты в радиолокационных системах (РЛС), в системах связи [3].

Однако принцип компенсации помех при повышении помехозащищенности АП ГНСС в режиме

____/

107

РАДИОТЕХНИКА И СВЯЗЬ

поиска-обнаружения навигационных сигналов до настоящего времени не применялся.

Стоит отметить, что одним из видов помех, воздействующих на навигационные приемники, являются сигналоподобные помехи (СП). Для обоснования структуры навигационного приемника, функционирующего в режиме поиска навигационных сигналов с использованием принципа компенсации помех, необходимо рассмотреть задачи, решаемые компенсационным каналом.

Канал компенсации СП в АП ГНСС должен решать следующие задачи:

– определение факта наличия СП с заданной структурой и грубую оценку параметров помехи;

- точную оценку параметров СП.

Задача обнаружения и грубой оценки параметров помех может решаться с использованием схем известных обнаружителей. Задачу точной оценки параметров помех целесообразно решать с использованием следящих систем.

Возникает необходимость синтеза оптимальной структуры приемника навигационных сигналов в режиме поиска и обнаружения при воздействии СП.

Цель работы: Синтез канала компенсации помех с известной структурой в АП ГНСС при поиске-обнаружении навигационных сигналов.

Синтез алгоритма поиска-обнаружения лоподобных помех помехи

В общем виде навигационный сигнал, действующий на вход канала поиска навигационного сигнала АП ГНСС можно представить как:

$$y_k(t) = S_C(t_{k,j}, \lambda_{C,k}) + \theta S_{\Pi}(t_{k,j}, \lambda_{\Pi,k}) + n(t_{k,j}), k = \overline{1, N}$$
 (1)

 $S_{\mathrm{C}}(t_{j,k},\lambda_{\mathrm{c},k}) = A_{\mathrm{C}}G_{\mathrm{JK}}(t_{k,j} - \mathrm{ au}_{\mathrm{C},k})\cos(\omega_{\mathrm{C}}t_{k,j} + \mathrm{\phi}_{\mathrm{C},k})$ — навигационный сигнал, где $A_{\mathrm{C},k}$, ω_{C} ,, $\phi_{\mathrm{C},k}$ – амплитуда, частота и фаза, $G_{\rm JK}(t)$ — дальномерный код навигационного сигнала $S_\Pi(t_{k,j},\lambda_{c,k}) = A_\Pi G_\Pi(t_{k,j} - \tau_{c,k}) \cos(\omega_\Pi t_{k,j} + \phi_{\Pi,k})$ — сигналоподобная помеха, где $A_{\Pi,k}$, ω_Π , $\phi_{\Pi,k}$ — амплитуда, частота и фаза СП, подлежащие оценки, $G_{\Pi}(t)$ – псевдослучайная последовательность СП; θ – параметр, характеризующий наличие или отсутствие помехи в наблюдаемой реализации, который будем полагать случайной величиной, принимающей значение 0 или $\,$ где \hat{x}_k - фильтрационная оценка, полученная на k-ом 1 с априорными вероятностями $P_{\rm ap}(\theta=0), P_{\rm ap}(\theta=1)$.

Воспользуемся известным методическим подходом, представленным в [2]. В отличие от известного подхода предполагается, что помеха является полезным сигналом, а навигационный сигнал помехой.

При приеме СП на выходе корреляторов канала поиска помехи (КПП) формируется синфазная и квадратурные компоненты:

$$I_{\Pi}(N) = \sum_{k=1}^{N} y_k G_{\Pi}(t_k - \tau_j) T_{\partial} \cos(\omega_0 t_k)$$
(2)

$$Q_{\Pi}(N) = \sum_{k=1}^{N} y_k G_{\Pi}(t_k - \tau_j) T_{\hat{\sigma}} \sin(\omega_0 t_k)$$
(3)

Напряжение на выходе канала компенсации СП:

$$X_{\Pi}^{2}(N) = I_{\Pi}^{2}(N) + Q_{\Pi}^{2}(N)$$
(4)

По критерию Неймана-Пирсона уровень порога определяется как

$$h_{\Pi}(N) = X_{\Pi} \sqrt{2 \ln(1/F)}$$
 (5)

где h – пороговый уровень; X_Π – значение напряжения $C\Pi; F_{\Pi}$ – вероятность ложной тревоги.

Решение о наличии СП принимается при выполнении условия:

$$X_{\Pi} \ge h_{\Pi} \tag{6}$$

Таким образом, предложенный алгоритм обнаружения СП вычисляет огибающую X_{Π} на выходе компенсатора сигналоподобных помех (КСП) и сравнивает значение этой огибающей с порогом h_{Π} .

Синтез алгоритма оценки задержки сигна-

Для определения точной оценки параметров помех необходимо иметь данные об информативных параметрах помехи, в случае СП такими параметрами являются задержка τ_{Π} , амплитуда A_{Π} , фаза ϕ_{Π} .

Воспользуемся методикой синтеза, предложенной в [2]. Введем информативные параметры помехи – в объединенный вектор оцениваемых параметров. При этом задача сводится к синтезу алгоритма оценивания параметров помехи. Решением такой задачи, как известно, является расширенный фильтр Калмана [4], алгоритмы работы которого описываются следующими уравнениями:

$$\hat{x}_{k} = \widetilde{x}_{k} + D_{x,k} \left(\frac{\partial F_{k}(\widetilde{x})}{\partial x} \right)^{T}, \widetilde{x}_{k} = f_{k-1}(\widetilde{x}_{k-1})$$
(7)

шаге; \widetilde{x}_k – экстраполированная оценка; $D_{x,k}$ – матрица дисперсии фильтрационных оценок; $F_x(x) = \ln \overline{p}_k(\lambda)$ логарифм функционала правдоподобия $\overline{p}_k(\lambda)$, записанного для интервала $[t_{k-1}, t_k]$ и усредненного по множеству значений неинформативных параметров. Интервал оценивания $[t_{k-1}, t_k]$ в АП ГНСС составляет 1 мс.

Синтез алгоритма оценивания задержки сводится к синтезу дискриминатора:

$$U_{\partial k} = \left(\frac{\partial F_k(\hat{x}_k)}{\partial x}\right)^T \tag{8}$$

108

по объединенным информационным параметрам помехи.

Проведем синтез дискриминатора задержки огибающей сигнала. Общее выражение для дискриминатора задержки огибающей имеет вид:

$$U_{\partial \tau_{\Pi,k}} = \frac{\partial F_k(\tau_{\Pi,k})}{\partial \tau_{\Pi}} \bigg|_{\tau_{\Pi,k} = \bar{\tau}_{\Pi,k}} \tag{9}$$

в котором в качестве $\partial \tilde{F}_k(\tau_{\Pi,k})$ следует использовать усредненную функцию правдоподобия:

$$\tilde{F}_{k}(\tau_{\Pi,k}) = \tilde{c}_{1} + \ln(ch(\frac{1}{\sigma^{2}}\sum_{i=1}^{N}y(t_{k-1,i})\cdot\tilde{s}(t_{k-1,i}\cdot c\tau_{\Pi,k})))$$
(10)

Подставив (10) в (9) и выполнив дифференцирование, получаем

$$U_{\partial \tau,k} = th\left(\frac{2A}{N_0} \tilde{I}_k\right) \times \frac{2A}{N_0} \sum_{i=1}^{N} y(t_{k-1,i}) \cdot \frac{\partial G_{\Pi}(t_{k-1,i} - \tilde{\tau}_{\Pi,k})}{\partial \tau} \cos(\omega_0 t_{k-1,i} + \omega_{\partial k}(i-1)T_{\partial} + \varphi_k)T_{\partial}$$
(11)

Дифференцирование $G_{\Pi}(t_{k-1,i}-\tilde{\tau}_{\Pi,k})$ по задержки часто заменяют вычислением конечной разности. Введем расстройку $\Delta \tau$ и запишем

$$\begin{split} &\frac{\partial G_{\Pi}(t_{k-1,i}-\tilde{\tau}_{\Pi,k})}{\partial \tau} \approx \\ \approx &\frac{G_{\Pi}(t_{k-1,i}-(\tilde{\tau}_{\Pi}+\Delta\tau/2))-G_{\Pi}(t_{k-1,i}-(\tilde{\tau}_{\Pi}-\Delta\tau/2))}{\Delta\tau} \end{split} \tag{12}$$

Подставляя данное представление в (11) и опуская несущественные константы, получаем следующее выражение для дискриминатора задержки огибающей

$$U_{\partial \tau_{\Pi,k}} = th(\frac{2A_{\Pi}}{N_0} \tilde{I}_{\Pi,k}) \cdot (\tilde{I}_{\Pi E,k} - \tilde{I}_{\Pi L,k})$$
(13)

При приеме СП на выходе корреляторов формируется следующие компоненты:

$$\begin{split} \tilde{I}_{\Pi,k} &= \sum_{i=1}^{N} y(t_{k-1,i}) \cos(\omega_{0} t_{k-1,i} + \\ &+ \omega_{\partial k} (i-1) T_{\partial} + \varphi_{k}) T_{\partial} \cdot G_{\Pi} (t_{k-1,i} - \tilde{\tau}_{\Pi,k}) \end{split} \tag{14}$$

$$\tilde{I}_{\Pi E,k} = \sum_{i=1}^{N} y(t_{k-1,i}) \cos(\omega_0 t_{k-1,i} + \omega_{\partial k}(i-1)T_{\partial} + \varphi_k) T_{\partial} \cdot G_{\Pi}(t_{k-1,i} - (\tilde{\tau}_{\Pi,k} + \Delta\tau/2))$$
(15)

$$\tilde{I}_{\Pi L,k} = \sum_{i=1}^{N} y(t_{k-1,i}) \cos(\omega_{0} t_{k-1,i} + \omega_{\partial k} (i-1) T_{\partial} + \varphi_{k}) T_{\partial} \cdot G_{\Pi} (t_{k-1,i} - (\tilde{\tau}_{\Pi,k} - \Delta \tau / 2))$$
(16)

где $G_{\Pi}(t_{k-l,i}-(\tilde{\tau}_{\Pi,k}\pm\Delta\tau/2))$ — опаздывание и опережение псевдослучайной последовательности.

Синтез алгоритма оценки фазы помехи

Воспользуемся методикой синтеза, приведенной в [2]. В соответствии с этой методикой запишем выражение для оптимального дискриминатора фазы сигнала

$$U_{\partial \varphi_{\Pi,k}} = \frac{\partial F_k(\varphi_{\Pi,k})}{\partial \varphi_{\Pi}} \bigg|_{\varphi_{\Pi,k} = \bar{\varphi}_{\Pi,k}}$$
(17)

В качестве $\partial \tilde{F}_k(\varphi_{\Pi,k})$ следует использовать выражение аналогичное (10). Подставив (10) в (17) и выполнив дифференцирование получим

$$U_{\partial \varphi_{\Pi,k}} = -th(\frac{2A}{N_0}\tilde{I}_k) \times \frac{2A}{N_0}\tilde{Q}_{\Pi,k}$$
(18)

$$\begin{split} \tilde{I}_{\Pi,k} &= \sum_{i=1}^{N} y(t_{k-1,i}) \cos(\omega_0 t_{k-1,i} + \\ &+ \omega_{\partial k} (i-1) T_{\partial} + \varphi_k) T_{\partial} \cdot G_{\Pi} (t_{k-1,i} - \tilde{\tau}_{\Pi,k}) \end{split} \tag{19}$$

$$\begin{split} \tilde{Q}_{\Pi,k} &= \sum_{i=1}^{N} y(t_{k-1,i}) \sin(\omega_{0} t_{k-1,i} + \\ &+ \omega_{\partial k} (i-1) T_{\partial} + \varphi_{k}) T_{\partial} \cdot G_{\Pi} (t_{k-1,i} - \tilde{\tau}_{\Pi,k}) \end{split}$$
(20)

Из (18—20) следует, что фазовый дискриминатор строится на базе синфазного \widetilde{I}_k и квадратурного \widetilde{Q}_k корреляторов. Характеристики фазовых детекторов приведены в [2]. Наиболее просто реализуемыми являются дискриминаторы, обладающие небольшим раскрывом ΠX .

Выражения (19–20), приведенные в [2], наиболее справедливы для сигналов модулированных навигационным сообщением. У этих типов дискриминаторов апертура ДХ π . Для СП, не модулированных навигационным сообщением, выражения (18–20) можно упростить:

$$U_{\partial \varphi_{\Pi,k}} = \frac{2A}{N_0} \tilde{Q}_{\Pi,k} \tag{21}$$

У этого типа дискриминатора апертура ДХ равна (14) 2π [5]. В случае воздействия на АП ГНСС СП $Q_{\Pi,k}$ будет соответствовать выражению (20).

Синтез алгоритма оценки амплитуды помех

Оценка напряжение на выходе дискриминатора амплитуды проводится по формуле (22)

$$U_{\partial A_{\Pi,k}} = \frac{\partial F_k(A_{\Pi,k})}{\partial A_{\Pi}} \bigg|_{A_{\Pi,k} = \tilde{A}_{\Pi,k}}$$
(22)

/109

ИНФОРМАЦИЯ и КОСМОС №4

РАДИОТЕХНИКА И СВЯЗЬ

Конкретизируем данное выражение[3], по аналогии можно записать:

$$U_{\partial A_{\Pi,k}} = \frac{2\tilde{I}_{\Pi}}{T_{\Pi}} \tag{23}$$

где T_{Π} — длительность помехи.

При приёме СП, $\tilde{I}_{\Pi,k}$ будет соответствовать выражению

$$\tilde{I}_{\Pi,k} = \sum_{i=1}^{N} y(t_{k-1,i}) \cos(\omega_0 t_{k-1,i} + \varphi_k) T_{\partial}$$
(24)

Синтез алгоритма поиска-обнаружения с учетом компенсации помехи

После получения точной оценки параметров помех возникает возможность формирования копии принимаемой помехи $\tilde{S}_{\Pi,k}$ и необходимость ее вычитания из смеси сигнал+шум y_k .

При формировании копии помехи в вычитающем устройстве компенсационного канала происходит вычитание сформированной копии помехи из поступающей смеси сигнала и шума, действующих на вход канала поиска навигационного сигнала АП ГНСС, тогда синфазные и квадратурные составляющие определяются в соответствии с выражениями:

$$I(N) = \sum_{i=1}^{N} (y_k - \tilde{S}_{\Pi,k}) \cdot G_{\Pi}(t_k - \tau_j) T_{\partial} \cos(\omega_0 t_k)$$
(25)

$$Q(N) = \sum_{i=1}^{N} (y_k - \tilde{S}_{\Pi,k}) \cdot G_{\Pi}(t_k - \tau_j) T_{\partial} \sin(\omega_0 t_k)$$
(26)

где $\widetilde{S}_{\Pi,k}$ – копия помехи:

$$\tilde{S}_{\Pi,k} = \tilde{A}_{\Pi} G_{\Pi} (t_k + \tilde{\tau}_3) \cos(\omega_0 t_k + \tilde{\varphi}_{\Pi})$$
(27)

где $\tilde{\tau}_{_3}$ — оценка задержки копия помехи, $\tilde{A}_{_\Pi}$ — оценка амплитуды копии помехи, $\tilde{\phi}_{_\Pi}$ — оценка фазы копии помехи.

Заключение

Разработанные математические модели представляют собой научно-методический и практический аппарат, в своей совокупности позволяющий разрабатывать перспективные образцы аппаратуры потребителей глобальных навигационных спутниковых систем, фильтрация помех в которых будет осуществляться на этапе поиска навигационных сигналов, что существенно повисит помехоустойчивость аппаратуры потребителей.

Работа выполнена при поддержке гранта Президента РФ HIII-6831.2016.8.

Литература

- 1. Шувалов, А. В. Синтез и анализ компенсационного алгоритма подавления структурно детерминированных помех / А.В. Шувалов // Радиотехника. 2005. № 7. С. 43–49.
- 2. Методы компенсации помех в аппаратуре потребителей глобальных навигационных спутниковых систем / В.В. Неровный [и др.]. М.: Научная книга, 2017. 226 с.
- 3. Защита от радиопомех / под ред. М.В. Максимова. М.: Сов. Радио. 1976. 496 с.
- 4. Перов, А. И. Статистическая теория радиотехнических систем / А.И. Перов. М.: Радиотехника, 2003. 320 с.
- 5. Неровный, В. В. Эффективность поиска и обнаружения BPSK сигналов в аппаратуре потребители ГНСС в условиях сигналоподобных помех / В.В. Неровный, П.Д. Коратаев, А.А. Литинский // Теория и техника радиосвязи. 2014. N_2 3. С. 27—31.