Адаптивный демодулятор псевдослучайных сигналов для беспилотного летательного аппарата, эффективный в условиях помех, похожих на сигнал

Adaptive demodulator of pseudorandom signals for unmanned aerial vehicle, effective in the interference, simular to signal

Биккенин / Bikkenin R.
Рафаэль Рифгатович
(tosir@sut.ru)
доктор технических наук, профессор,
заслуженный работник высшей школы РФ.
Военный институт дополнительного
профессионального образования ВУНЦ ВМФ
«Военно-морская академия имени Адмирала Флота
Советского Союза Н. Г. Кузнецова»
(ВМА им. Н. Г. Кузнецова) МО РФ,
доцент кафедры боевого применения средств связи.
г. Санкт-Петербург

Андрюков / Andrukov A.
Алексей Анатольевич
(aaa260977@yandex.ru)
Военный институт дополнительного
профессионального образования ВУНЦ ВМФ
ВМА им. Н. Г. Кузнецова,
преподаватель кафедры боевого применения средств связи.
г. Санкт-Петербург

Ключевые слова: беспилотный летательный аппарат – unmanned aerial vehicle; смещение частоты несущей – carrier frequency offset; относительная фазовая модуляция – differential phase shift keying; адаптивная демодуляция – adaptive demodulation; помеха, похожая на сигнал – noise, similar to signal; вероятность ошибки – error probability.

Предложен адаптивный автокорреляционный демодулятор псевдослучайных сигналов, эффективный в канале со смещением частоты несущей при действии помехи, похожей на сигнал. Показана возможность повышения помехоустойчивости приема информации в режиме полета БЛА, когда отсутствует смещение частоты.

The adaptive autocorrelation demodulator of pseudorandom signals in the channel with an offset carrier frequency and interference, similar to the signal, is proposed in that article. There is the possibility of increasing noise stability of reception of information in flight mode UAV when there isn't frequency offset.

В настоящее время все большее внимание специалистов привлекают беспилотные летательные аппараты (БЛА). Благодаря своим качествам, они с высокой эффективностью могут решать различные задачи в гражданских и военных областях:

– мониторинг экологической обстановки;

– поиск терпящих бедствие на море и в труднодоступных районах;

– ведение разведки;

– наведение пилотируемой авиации на заданные цели;

– ретрансляция радиосигналов;

– постановка организованных (преднамеренных) помех радиоэлектронными средствами противника и др.

Обладая сравнительно невысокой стоимостью и малыми габаритами по отношению к пилотируемым летательным аппаратам, БЛА способны решать многие задачи практически в режиме «онлайн», находясь в течение длительного времени в заданных районах, барражируя на небольшой скорости, либо зависая в необходимой точке воздушного пространства.

Ясно, что БЛА обладают и рядом недостатков, имеются и значительные нерешенные проблемы при их создании и эксплуатации. Тем не менее, по данным [1, 2] и других источников, процесс их внедрения в гражданские и силовые структуры, в том числе в Вооруженные Силы РФ стал необратимым и поступательным.

В 2017 г. объявлено о создании полков БЛА в Военно-Морском Флоте РФ (данные с сайта: http://flot.com/2017/Бпла11). Эти воинские части формируются в составе объединенного командования войск и сил Восточного военного округа на полуострове Камчатка. Новые полки оснащаются БЛА «Орлан 10» и «Форпост».

По мнению экспертов, оснащение ВМФ новыми средствами даст ему возможность решать названные выше задачи и обеспечит его уникальными возможностями в мирное и военное время. Так, БЛА «Орлан-10» при полетном времени более 10 часов способен передавать радиосигналы на расстояниях до 120 км. БЛА «Форпост» при полезной нагрузке 100 кг, высоте полета около 6 км может выполнять задачи в течение почти 18 час при дальности полета до 200 км.

1 2018.indd 20 30.03.2018 11:49:03

С учетом специфики перемещений в пространстве БЛА обмен информацией с ними целесообразно осуществлять на основе сигналов, не чувствительных к доплеровским смещениям частоты. Помимо этого, БЛА, решающие задачи военного характера, могут подвергаться воздействию организованных (преднамеренных) помех, по структуре и форме похожих на радиосигналы, применяемые для обмена информацией.

В [3] было предложено использовать псевдослучайные сигналы, формируемые на основе относительной фазовой модуляции второго порядка (ОФМ-2), которая в иностранной литературе именуется Double differential phase shift Keying (DDPSK). В [4] показано, что DDPSK-сигналы обладают нечувствительностью к произвольным изменениям частоты и фазы в канале радиосвязи. Дополнительная псевдослучайная (ПС) модуляция позволяет обеспечить устойчивый прием названных сигналов, кроме того, при воздействии организованных преднамеренных помех с энергетикой, превышающей сигнал. Названные сигналы могут быть описаны соотношением

$$S_{\text{с}}(t) = U_{\text{с}} \sum_{k=1}^{n} \pi_k(t) \operatorname{rect}\left(t-(k-1)T\right) \sin\left[\omega t + \varphi_{\text{с}}(t)\right], \quad i = 1, 2, \ldots \tag{1}$$

где $\operatorname{rect}\left(t-(k-1)T\right)$ – единичный импульс длительности T, задающий временной интервал ПС-ОФМ-2 сигнала, $\pi_k(t) = (-1)^{\alpha_k}$, $(k-1)T \le t \le kT$, $k = \overline{1,n}$, $\alpha_k = \alpha_{k-1} \oplus \Delta_k$, $\Delta_k = \Delta_{k-1} \oplus \gamma_k$, $\oplus$ – знак сложения по модулю два, $\alpha_k \in \{0,1\}$ – величина, определяющая правило формирования ПС-ОФМ-2 сигнала, $U_{\text{с}}$, ω, $\varphi_{\text{с}}(t)$ – амплитуда, частота и фазовый сдвиг сигнала, в общем случае учитывающий эффект Доплера.

Для обработки ПС-ОФМ-2 сигналов (1) в условиях смещения частоты несущего колебания и действия сигналоподобных организованных помех

$$N(t) = U_{\text{п}} \pi_{\text{п}}(t) \sin\left[\omega t + \varphi_{\text{п}}(t)\right],$$

где $\pi_{\text{п}}(t) = (-1)^{\delta_i}$, $\delta_i \in \{0,1\}$ – равновероятные и взаимонезависимые случайные величины, определяющие дискретную фазовую модуляцию помехи, в [3] предложен автокорреляционный демодулятор с процедурой

$$\operatorname{sign}\lambda = \operatorname{sign}\left[\sum_{k=1}^{n} (-1)^{\gamma_k} \int_0^T u_k(t) u_{k-1}(t) dt \int_0^T u_{k-1}(t) u_{k-2}(t) dt + \right.$$
$$\left. + \int_0^T u_k(t) u_{k-1}^*(t) dt \int_0^T u_{k-1}(t) u_{k-2}^*(t) dt \right], \tag{2}$$

где $\operatorname{sign}\lambda = \operatorname{sign}\left[\sum_{k=1}^{n} (-1)^{\gamma_k} \left(X_k X_{k-1} + X_k^* X_{k-1}^*\right)\right]$ – правило определения полярности величины в квадратных скобках, $u(t)$, $u_{\text{k}-1}(t)$, $u_{\text{k}-2}(t)$ – три последовательные во времени посылки, являющиеся смесью передаваемого сигнала и помехи, T – длительность посылки сигнала, $\gamma_k \in \{0,1\}$, $k = \overline{1,n}$ – k-й элемент псевдослучайной последовательности (ПСП), участвующей в формировании на передаче и обработке на приеме радиосигнала, «*» – знак комплексного сопряжения.

Если в (2) $\lambda > 0$, то регистрируется информационный символ $a_i = 0$, $i = 1, 2, \ldots$, в противном случае, при $\lambda < 0$ $a_i = 1$.

Вероятность ошибочного решения при обработке ПС-ОФМ-2 сигналов (1) можно оценивать посредством соотношения, полученного в [3]

$$P_{\text{ош}}^{1} \approx 1 - F\left\{\left[\frac{(1+q)^2 q^2 n}{1+8q+13q^2+6q^3}\right]^{\frac{1}{2}}\right\}, \tag{3}$$

где $F(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{x} e^{-t^2/2} dt$ – интеграл вероятностей, $q = P_{\text{с}} / P_{\text{п}}$ – отношение мощности сигнала $P_{\text{с}}$ к мощности помехи $P_{\text{п}}$ на длительности одной посылки, n – база сложного сигнала.

Расчеты [3] показали, что в условиях смещений частоты радиосигнала и действии сигналоподобной помехи, вдвое превышающей сигнал по мощности, когда $q = P_{\text{с}} / P_{\text{п}} = 0{,}5$, и базе псевдослучайного сигнала $n = 100$, вероятность ошибочного приема $P_{\text{ош}} \approx 6{,}21 \cdot 10^{-3}$.

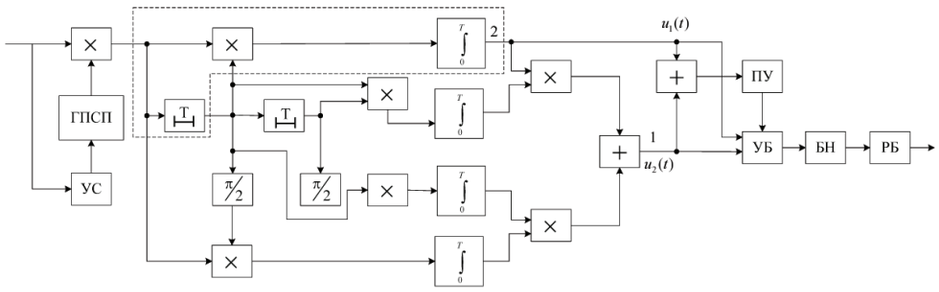

Рис. 1. Адаптивный демодулятор псевдослучайных сигналов с относительной фазовой модуляцией

1 2018.indd 21 30.03.2018 11:49:04

Очевидно, что в современных условиях названная величина $P_{ош}$ не может в полной мере удовлетворять требованиям достоверности приема дискретной информации. Поэтому для повышения качества обмена данными в каналах радиосвязи с БЛА потребуется применять псевдослучайные ОФМ-2 сигналы с большими значениями базы. С другой стороны, в определенных режимах применения БЛА каналы обмена данными могут не иметь смещений частоты, что не потребует обязательного использования устойчивых к эффекту Доплера ПС-ОФМ-2 сигналов. Такие ситуации имеют место, когда БЛА вертолетного типа зависает в заданной точке воздушного пространства. В этом случае для обмена информацией в условиях воздействия сигналоподобных (преднамеренных) помех можно перейти к использованию псевдослучайных сигналов с относительной фазовой модуляцией (ПС-ОФМ), которые не являются устойчивыми к смещениям частоты, но позволяют повысить качество приема по сравнению с ПС-ОФМ-2 сигналами при аналогичной автокорреляционной обработке. С целью экономии массо-габаритных характеристик БЛА в составе бортового оборудования для таких ситуаций целесообразно предусмотреть адаптивный демодулятор с автоматическим переключением ПС-ОФМ-2 сигналов (режим «Полет») на ПС-ОФМ сигналы (режим «Зависание»).

Структурная схема адаптивного автокорреляционного демодулятора ПС-ОФМ-2 – ПС-ОФМ сигналов представлена на рис. 1. Она содержит подключенные своими выходами к блоку сложения две ветви некогерентного квадратурного приема с двумя элементами задержки на длительность посылки (элементов) сигнала T каждая, что дает возможность использовать механизм обработки ОФМ-2 на основе сравнения трех соседних посылок. Вместе с тем часть элементов одной из ветвей демодулятора, выделенных пунктирной линией, позволяют реализовать автокорреляционную некогерентную обработку сигналов с ОФМ [5].

Задача заключается в том, чтобы в необходимый момент осуществить автоматический переход с режима ОФМ-2 на режим ОФМ и наоборот. Для этого в состав демодулятора включены дополнительный блок сложения, пороговое устройство ПУ и управляющий блок УБ.

Кроме этого, на входе демодулятора включены перемножитель и генератор псевдослучайной последовательности ГПСП с устройством синхронизации УС, а на выходе – блок накопления БН на длительности базы n сложного псевдослучайного сигнала и решающий блок РБ. Данные элементы позволяют реализовать обработку шумоподобного сигнала с ее положительными свойствами в условиях преднамеренных сигналоподобных помех.

Рассмотрим процедуру обработки подробнее. Пусть на вход демодулятора последовательно поступают посылки сигнала

$$u_{k-1}(t) = U_c \cos\left(\omega t + \varphi_{k-1} + \varphi_c\right),$$
$$u_k(t) = U_c \cos\left(\omega t + \varphi_k + \varphi_c + \Delta\varphi T\right),$$
$$u_{k+1}(t) = U_c \cos\left(\omega t + \varphi_{k+1} + \varphi_c + 2\Delta\varphi T\right),$$

φ_{k-1}, φ_k, φ_{k+1} – информационные фазы (k–1)-й, k-й и (k+1)-й посылок сигнала, $k = \overline{1,n}$, $\Delta\omega$ – сдвиг частоты вследствие движения БЛА, T – длительность элемента сигнала, φ_c – начальная фаза сигнала.

Предположим, что БЛА находится в некоторой точке пространства, и частотный сдвиг отсутствует,

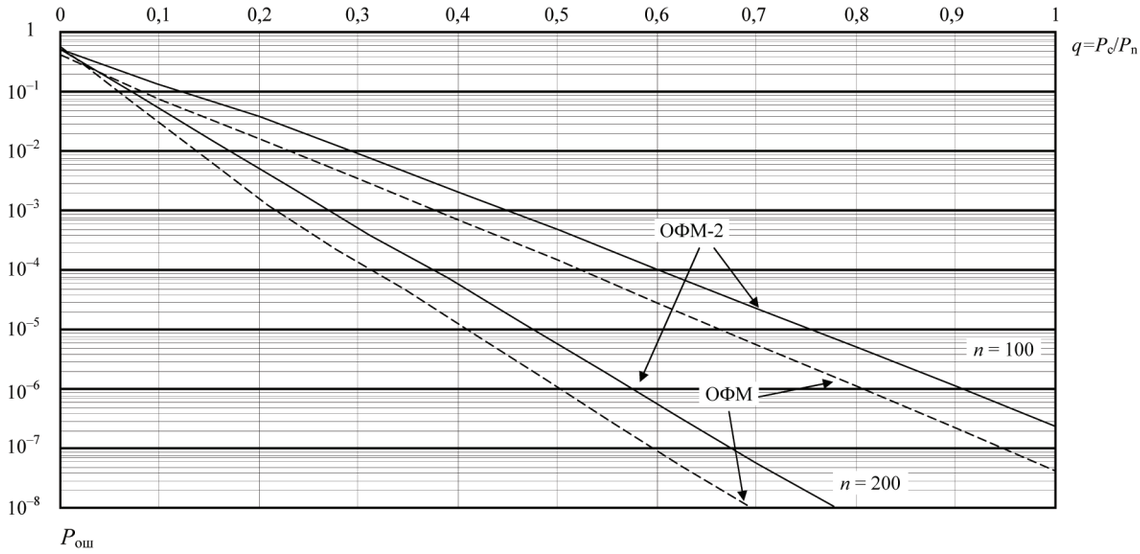

Рис. 2. Зависимости вероятностей ошибочного приема адаптивного демодулятора для псевдослучайных ОФМ и ОФМ-2 сигналов

1 2018.indd 22 30.03.2018 11:49:05

и пусть первые разности фаз между соседними посылками равны π, т. е.

$$\Delta^1\varphi_{k+1} = \varphi_{k+1} - \varphi_k = \pi,$$
$$\Delta^1\varphi_k = \varphi_k - \varphi_{k-1} = \pi. \quad (4)$$

Тогда после объединения двух ветвей квадратурного приема на выходе первого блока сложения (точка 1) сигнал будет пропорционален косинусу второй разности фаз [6] $\Delta^2\varphi_{k+1} = \Delta^1\varphi_{k+1} - \Delta^1\varphi_k = 0$ и имеет значение

$$u_2(t) = \frac{U_c^2 T}{2}\cos\Delta^2\varphi_{k+1} = \frac{U_c^2 T}{2}.$$

На выходе интегратора в точке 2 сигнал оказывается пропорциональным косинусу первой разности фаз (4) [6]

$$u_1(t) = \frac{U_c^2 T}{2}\cos\Delta^1\varphi_{k+1} = \frac{U_c^2 T}{2}\cos\Delta^1\varphi_k = \frac{-U_c^2 T}{2}.$$

Следовательно, на входы дополнительного блока сложения подаются два противоположных по знаку сигнала $u_1(t)$ и $u_2(t)$. При равенстве их амплитуд на входе порогового устройства разностный сигнал отсутствует. В этом случае управляющий блок подключит к блоку накопления выход интегратора (точка 2), то есть адаптивный демодулятор сыграет роль автокорреляционного демодулятора ПС-ОФМ сигнала.

Если теперь из-за перемещений БЛА (режим «Полет») появляется сдвиг частоты Δω, то первые разности фаз между посылками примут вид

$$\Delta^1\varphi_{k+1} = \varphi_{k+1} - \varphi_k + \Delta\omega T,$$
$$\Delta^1\varphi_k = \varphi_k - \varphi_{k-1} + \Delta\omega T,$$

имея зависимость от доплеровского смещения частоты.

В отличие от этого вторая разность фаз

$$\Delta^2\varphi_{k+1} = \Delta^1\varphi_{k+1} - \Delta^1\varphi_k = \varphi_{k+1} - 2\varphi_k + \varphi_{k-1}$$

не имеет зависимости от произвольного сдвига частоты Δω, что и определяет положительное свойство ОФМ-2 [6]. Иными словами, на выходе блока сложения в точке 1 сигнал не изменится.

В результате, в отличие от предыдущего случая, на входы дополнительного блока сложения поступят два сигнала, различные как по знаку, так и по амплитуде. Разностный сигнал превысит пороговое значение, что заставит управляющий блок подключить к блоку накопления ту часть демодулятора, которая реализует автокорреляционную обработку ПС-ОФМ-2 сигнала. Значение порога может быть выбрано опытным путем. Заметим также, что описанное выше будет реализовываться и при иных соотношениях разностей фаз.

Таким образом, на различных этапах функционирования БЛА адаптивный демодулятор будет производить автоматическое переключение режимов работы – ПС-ОФМ или ПС-ОФМ-2.

Оценим теперь величину вероятности ошибки при реализации режима приема ПС-ОФМ сигналов. Процедура обработки в этом случае, в отличие от (2), опишется соотношением [5]

$$\operatorname{sign}\varepsilon = \operatorname{sign}\left[\sum_{k=1}^{n}(-1)^{\gamma_k} X_k\right], \quad (5)$$

где $X_k = \int_0^T u_k(t)u_{k-1}(t)dt$, $u_k(t)$, $u_{k-1}(t)$ – текущая и задержанная на длительность T одного элемента аддитивная смесь сигнала и помехи.

Следуя [5], можно показать, что величина выборки ε в (5) имеет вид

$$\varepsilon = nq + \sum_{k=1}^{n}\varepsilon_k,$$

$$\varepsilon_k = \begin{cases} +2\sqrt{q}\cos\theta + 1, & P = 1/4, \\ -2\sqrt{q}\cos\theta + 1, & P = 1/4, \\ -1, & P = 1/2, \end{cases}$$

где $q = P_c / P_п$ и n – определены в (3), $\theta = \varphi_c - \varphi_п$ – разность фаз сигнала и организованной преднамеренной помехи.

Далее несложно найти моментные характеристики величины ε.

$$M\{\varepsilon\} = nq, \quad D\{\varepsilon\} = n\left(2q\cos^2\theta + 1\right).$$

В предположении гауссовской аппроконмации ε от псевдослучайных преобразований во время обработки сложного шумоподобного сигнала получим следующее соотношение для вероятности ошибочного приема ПС-ОФМ сигнала

$$P_{ош}^2 \approx 1 - F\left(\sqrt{\frac{nq^2}{2q\cos^2\theta + 1}}\right),$$

где $F(x)$ – определено в (3).

Результаты вычислений $P^1_{ош}$ по (3) для случая наиболее опасного воздействия преднамеренной помехи, когда она является противофазной к ПС-ОФМ-2 сигналу, $\theta = \varphi_c - \varphi_п = 0$, представлены на рис. 2. Здесь также показаны графические зависимости $P^2_{ош}$, рассчитанные по соотношению (6) для псевдослучайного ОФМ сигнала. В качестве примера для обоих сигналов – ПС-ОФМ-2 и ПС-ОФМ было выбрано одинаковое значение базы $n = 100$ и диапазон изменений соотношений сигнал/помеха $0 < q < 1$. Видно, что при помехе, вдвое превышающей по мощности сигнал, когда $q = P_c / P_п = 0{,}5$, и базе ПС-ОФМ-2 равной $n = 100$, при вычислениях по (3) вероятность ошибочного приема составляет $P^1_{ош} \approx 3{,}21 \cdot 10^{-3}$ Однако полученные при расчетах значения величины $P^1_{ош}$ для псевдослучайных сигналов ОФМ-2 в совре-

1 2018.indd 23 30.03.2018 11:49:07

менных условиях при воздействии организованных (преднамеренных) помех не в полной мере удовлетворяют требованиям по достоверности приема дискретной информации.

Отметим, что в беспилотных летательных аппаратах псевдослучайные сигналы, формируемые на основе ОФМ-2 в режиме «Полет», можно использовать в каналах управления только при пространственных перемещениях аппаратов в заданный район, когда обмен информацией осуществляется с учетом влияния эффекта Доплера. При нахождении БЛА в заданной точке в режиме «Зависание» для решения различных задач, в том числе ретрансляции радиосигналов, адаптивный демодулятор может перейти путем автоматического переключения в более помехоустойчивый режим. В этом случае будут использоваться ОФМ псевдослучайные сигналы, что приведет к повышению помехоустойчивости приема информации. Так, вычисления по (6) показывают, что вероятность ошибки в данной ситуации при сохранении тех же параметров (базы сигнала и соотношения сигнал/помеха) составит $P^2_{\text{ош}} \approx 3{,}54 \cdot 10^{-5}$, то есть помехоустойчивость повышается.

При увеличении базы сигнала, например до $n = 200$, будет иметь место определенный выигрыш в помехоустойчивости приема в условиях воздействия помех, похожих на сигнал, но при этом увеличится и время передачи оперативно-важных сообщений, что не всегда дает возможность своевременно доставлять необходимую информацию. Поэтому выбор значения базы псевдослучайного сигнала следует осуществлять на компромиссной основе.

В целом применение адаптивного демодулятора псевдослучайных сигналов позволит более качественно реализовать технологический ресурс беспилотного летательного аппарата для решения различных задач в военной и гражданской сферах. В частности, расширяются возможности радиосистем связи с подвижными объектами, в том числе и по ретрансляции радиосигналов, в условиях сложной помеховой обстановки при создании противником сигналоподобных преднамеренных помех с энергетическим превосходством над сигналом.

Литература

1. Кошкин, Р. П. Беспилотная авиация — новая отрасль авиационных технологий / Р.П. Кошкин // Стратегические приоритеты. – 2016. – № 1 (9). – С. 22–43.

2. Боев, Н. М. Анализ командно-телеметрической радиолинии связи с беспилотными летательными аппаратами / Н.М. Боев // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета им. акад. М. Ф. Решетнева. – 2012. – Вып. 2 (42). – С. 86–91.

3. Биккенин, Р. Р. Прием псевдослучайных сигналов со смещенной частотой несущей в условиях помех, похожих на сигнал / Р.Р. Биккенин, А.А. Андрюков // Информация и Космос. – 2016. – № 1. – С. 26–31.

4. Van Alphen, D. K. Higher-order differential phase-shift keyed modulation / D.K. Van Alphen, W.C. Lindsey // IEEE Trans. Commun. – April 1994. – Vol. 42. – P. 440–448..

5. Биккенин, Р. Р. Помехоустойчивость автокорреляционного приема псевдослучайных сигналов с относительной фазовой манипуляцией в условиях помех, похожих на сигнал / Р.Р. Биккенин // Радиотехника и электроника. – 1996. – Т. 41, № 6. – С. 715–719.

6. Окунев, Ю. Б. Цифровая передача информации фазоманипулированными сигналами / Ю.Б. Окунев. – М.: Радио и связь, 1991. – 296 с.

1 2018.indd 24 30.03.2018 11:49:07