

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2023.10.11>

УДК: 621.391

СПОСОБ ПОВЫШЕНИЯ ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТИ РАДИОЛИНИИ СВЯЗИ В УСЛОВИЯХ ДЕСТРУКТИВНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ПРЕДНАМЕРЕННЫХ ПОМЕХ

А.А. Пармонов¹, В.З. Хоанг²

¹МИРЭА – Российский технологический университет,
119454, Москва, просп. Вернадского, д. 78

²Вьетнамский государственный технический университет им. Ле Куй Дона,
100000, Ханой, ул. Хоанг Куок Вьет, д. 100

Статья поступила в редакцию 14 июля 2023 г.

Аннотация. Проведена оценка помехоустойчивости приема сигналов ОФТ (DPSK) в режиме псевдослучайной перестройки рабочей частоты (ППРЧ) для командных радиолиний управления беспилотными летательными аппаратами (БПЛА) в условиях воздействия узкополосной шумовой помехи (шумовой помехи в части полосы). Показано, что помехоустойчивость передачи данных для БПЛА в условиях деструктивного воздействия помех может быть повышена за счет применения режима внутрисимвольной ППРЧ с реализацией алгоритма весовой обработки сигналов для приема этих сигналов. Методом математического моделирования показано, что работа в режиме ППРЧ с отключением сильно пораженных преднамеренными помехами каналов позволяет обеспечить дополнительное повышение помехоустойчивости передачи информации для радиолинии связи с БПЛА.

Ключевые слова: помехоустойчивость, псевдослучайная перестройка рабочей частоты, вероятность битовой ошибки, радиолиния связи.

Автор для переписки: Хоанг Ван Зунг, tuandung@mail.ru

Введение

Одним из эффективных способов борьбы с различными видами преднамеренных и непреднамеренных помех является использование метода передачи информации с псевдослучайной перестройкой рабочей частоты (ППРЧ) [1].

Метод ППРЧ широко используется в современных системах передачи информации различного назначения. В последнее время данный метод нашел широкое применение при организации связи в радиолиниях управления БПЛА как коммерческого, так и военного назначения. Для БПЛА в командных радиолиниях управления, формируемых в разных диапазонах частот (УКВ, L, S, C, X, и Ku), применяются различные способы повышения помехозащищенности, наиболее эффективным из которых считается использование режима ППРЧ при передаче сигналов ОФТ (DBPSK), или ДОФТ (DQPSK) с возможностью автоматической перестройкой частоты на наименее пораженные помехами каналы [2].

В командных радиолиниях управления БПЛА скорость передачи данных в УКВ диапазоне невысока (от 2.4 до 16 кбит/с), поэтому для обеспечения заданного уровня помехоустойчивости целесообразно использовать метод передачи с внутрисимвольной ППРЧ, при которой передача информации осуществляется путем разделения каждого информационного символа длительностью T_s на L независимых элементов (субсимволов) [3]) длительностью T_h каждый, как это показано на рис.1. Далее каждый субсимвол передается в соответствии с заданной программой перестройки частот (по псевдослучайному коду).

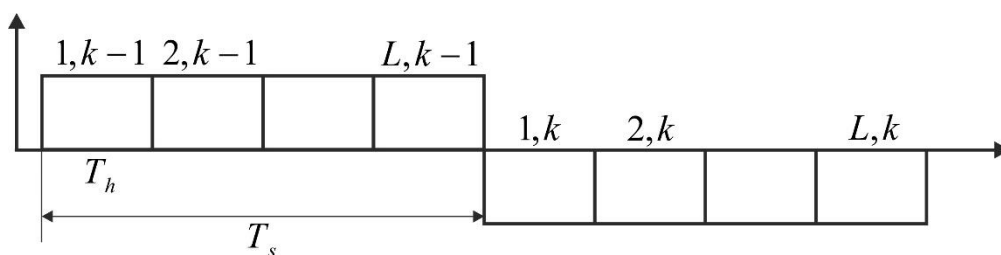


Рис. 1. Разбиение символа на субсимволы.

Для подавления радиолиний управления и передачи данных БПЛА широко применяются помехи, которые перекрывают рабочий диапазон частот, используемый для организации связи с БПЛА. К таким помехам относятся заградительная шумовая помеха (белый шум высокой мощности) во всем диапазоне или узкополосная шумовая помеха, скользящая по диапазону частот [2]. Однако для эффективного подавления каналов управления и передачи данных с ППРЧ постановщику помех с ограниченным энергетическим ресурсом целесообразно выставлять шумовую помеху только в части полосы частот, распределяя имеющуюся мощность станции постановки помех на ρ -й части рабочих частот подавляемой радиолинии. Спектральная плотность мощности $N_{\text{п}}$ данной помехи, которую дальше будем называть узкополосной, определяется уравнением [1-3]:

$$N_{\text{п}} = \begin{cases} P_{\text{п}}/\rho\Delta F, & \text{в полосе } \rho\Delta F \\ 0, & \text{в полосе } (1-\rho)\Delta F \end{cases},$$

где ρ – доля пораженной помехами полосы частот, ($0 \leq \rho \leq 1$).

При работе в режиме внутрисимвольной ППРЧ в условиях воздействия узкополосной шумовой помехи в части полосы субсимволы будут поражены помехой с вероятностью ρ , а вероятность того, что эти же субсимволы не поражены помехой, равна $(1 - \rho)$ [3].

1. Модель радиолинии связи

При передаче информации в режиме внутрисимвольной ППРЧ входная реализация $r(t)$ представлена в виде низкочастотных составляющих сигналов. Принимаемая смесь сигналов и помех на вход приемника для i -го субсимвола на k -м и $(k - 1)$ -м тактах представлены в следующем виде [3]:

$$r_{i,k}(t) = s_{i,k}(t) + n_{i,k}(t), \quad (1a)$$

$$r_{i,k-1}(t) = s_{i,k-1}(t) + n_{i,k-1}(t), \quad (1б)$$

а в присутствии узкополосной шумовой помехи в части полосы:

$$r_{i,k}(t) = s_{i,k}(t) + n_{i,k}(t) + j_{i,k}(t), \quad (2a)$$

$$r_{i,k-1}(t) = s_{i,k-1}(t) + n_{i,k-1}(t) + j_{i,k-1}(t), \quad (2б)$$

где $s_{i,k-1}(t), s_{i,k}(t)$ – сигнал, несущий информацию на $(k-1)$ -м и k -м интервалах времени соответственно:

$$s_{i,k}(t) = \sqrt{2P_s} \cos(2\pi f_c + \theta_{i,k} - \varphi) + \sqrt{2P_s} \sin(2\pi f_c + \theta_{i,k} - \varphi), \quad (3а)$$

$$s_{i,k-1}(t) = \sqrt{2P_s} \cos(2\pi f_c + \theta_{i,k-1} - \varphi) + \sqrt{2P_s} \sin(2\pi f_c + \theta_{i,k-1} - \varphi). \quad (3б)$$

Здесь f_c – частота сигнала, φ – фаза несущей, P_s – мощность сигнала,

$\theta_{i,k}, \theta_{i,k-1}$ – фазовой угол переданного сигнала на k -м и $(k-1)$ -м интервале времени,

$n_{i,k}(t), n_{i,k-1}(t)$ – собственные шумы приемника на k -м и $(k-1)$ -м интервале времени,

$j_{i,k}(t), j_{i,k-1}(t)$ – узкополосная шумовая помеха в части полосы с мощностью $\sigma_{\Pi}^2 = P_{\Pi}/(\rho\Delta F)F_h = P_{\Pi}T_h/(\rho\Delta F)$ на k -м и $(k-1)$ -м интервалах времени, P_{Π} – мощность узкополосных шумовых помех, F_h – ширина спектра субсимвола.

2. Алгоритм приема сигналов ОФТ с внутрисимвольной ППРЧ

Для канала управления БПЛА, как и для любого канала передачи данных, при работе в режиме внутрисимвольной ППРЧ с использованием ОФТ модуляции предполагается, что смена рабочих частот при ППРЧ производится без разрыва фазы, тактовая (временная) синхронизация в приемнике обеспечена. Также будем считать, что при передаче символа «0» разность фаз между двумя соседними символами равна нулю [3, 4].

При воздействии помех в режиме ППРЧ с ОФТ для принятия решения о переданном информационном символе целесообразно применение алгоритма адаптивного некогерентного приема сигналов с весовой обработкой по принципу «упреждения» [3]. Для реализации данного алгоритма приема формируется весовой множитель v_i вида:

$$v_i = 1/\sigma_{i,k-1}^2, \quad (4)$$

где $\sigma_{i,k-1}^2$ – суммарная мощность сигнала и помех на $(k-1)$ -м такте.

$$\sigma_{i,k-1}^2 = \begin{cases} \sigma_0^2, & \text{в отсутствии помех } (\rho = 0), \\ \sigma_0^2 + \sigma_{\Pi}^2, & \text{в присутствии помех } (\rho \neq 0). \end{cases} \quad (5)$$

Необходимо отметить, что на практике формирование весовых коэффициентов происходит с погрешностями из-за погрешностей оценок отношений сигнал/(шум плюс помеха). С учетом этого, весовой множитель можно преобразовать к следующему виду [3, 5]:

$$v_i = 1/(d_v \sigma_{i,k-1}^2) \approx 1/(\sigma_0^2 + d_v \sigma_{\Pi}^2), \text{ так как } (\sigma_0^2 \ll \sigma_{\Pi}^2), \quad (6)$$

где d_v – коэффициент, учитывающий погрешность определения весового множителя ($0 \leq d_v \leq 1$).

Алгоритм оптимального некогерентного приема сигнала ОФТ в режиме внутрисимвольной ППРЧ требует вычисления статистики принятия решения в виде [3]:

$$\begin{aligned} D &= \text{Re} \left[\sum_{i=1}^L r_{i,k}(t) r_{i,k-1}^*(t) v_i \right] \\ &= \sum_{i=1}^L (x_{i,k} x_{i,k-1} + y_{i,k} y_{i,k-1}) v_i \\ &= \sum_{i=1}^L \left[\left(\frac{x_{i,k} + x_{i,k-1}}{2} \right)^2 - \left(\frac{x_{i,k} - x_{i,k-1}}{2} \right)^2 + \left(\frac{y_{i,k} + y_{i,k-1}}{2} \right)^2 - \left(\frac{y_{i,k} - y_{i,k-1}}{2} \right)^2 \right] v_i \quad (7) \\ &= \sum_{i=1}^L \left[(a_{i,1}^2 + a_{i,2}^2) - (a_{i,3}^2 + a_{i,4}^2) \right] v_i \\ &= z_1 - z_2. \end{aligned}$$

где $x_{i,k}, x_{i,k-1}, y_{i,k}, y_{i,k-1}$ – синфазные и квадратурные компоненты принятого сигнала. В выражении (7) величины $a_{i,1}, a_{i,2}, a_{i,3}, a_{i,4}, i = \overline{1..L}$ представляются случайными гауссовскими.

На рис. 2 приведена структурная схема приемного устройства разнесенных сигналов ОФТ (DBPSK) с внутрисимвольной ППРЧ [3].

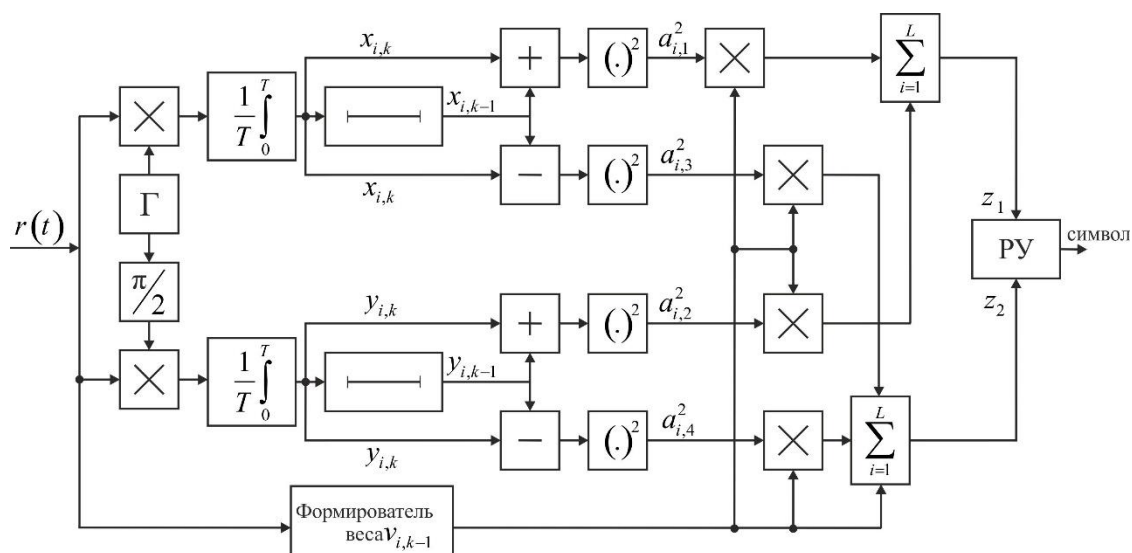


Рис. 2. Схема алгоритма приема сигналов ОФТ с внутрисимвольной ППРЧ.

Наличие дополнительного канала вычисления весовых коэффициентов позволило учесть влияние помех с целью последующего уменьшения этого влияния на принятое решение о переданном информационном символе. При двоичной ОФТ фаза передаваемого сигнала имеет два возможных значения: 0 и π . При условии передачи символа «0» разность фаз между двумя смежными сигналами равна 0, тогда ошибка приема символа возникает при условии [3-5]:

$$D = \text{Re}[r_k(t)r_{k-1}(t)] < 0. \tag{8}$$

Необходимо отметить, что для каналов управления БПЛА в режиме ППРЧ с целью обеспечения более высокой помехоустойчивости (т.е. повышения устойчивости управления БПЛА) предусматривается возможность перестройки частоты на наименее пораженные помехами каналы, либо отключение сильно пораженных помехами каналов (или частот). Это позволит на этапе обработки сигналов пренебречь влиянием сильно пораженных помехами символов и тем самым повысить достоверность передачи данных при реализации рассматриваемого алгоритма приема.

3. Результаты моделирования

Приведем оценку помехоустойчивости приема сигналов ОФТ в режиме внутрисимвольной ППРЧ при воздействии узкополосных шумовых помех.

На рис. 3, 4 представлены результаты математического моделирования в виде зависимости средней вероятности битовой ошибки (СВО) P_b приема ОФТ сигналов с ППРЧ от отношения сигнал/помеха (P_s/P_n). В качестве исходных данных предлагается, что доля пораженной помехами полосы частот ($\rho = 0.01, 0.05, 0.1, 0.2$) и значение отношения сигнал/шум (ОСШ) приемника 13 дБ. Кривые получены для режима ППРЧ с посимвольной ППРЧ ($L = 1$) и с трехкратным внутрисимвольным разнесением символа ($L = 3$).

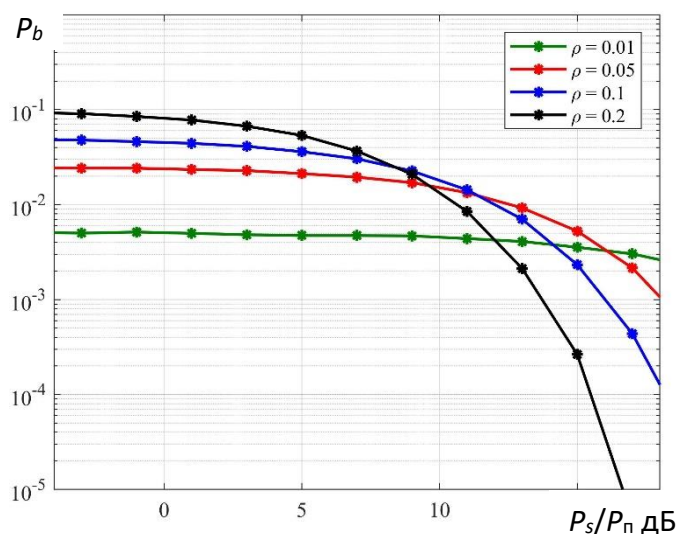


Рис. 3. Зависимость СВО на бит P_b от отношения сигнал/помеха при передаче сигналов в режиме посимвольной ППРЧ.

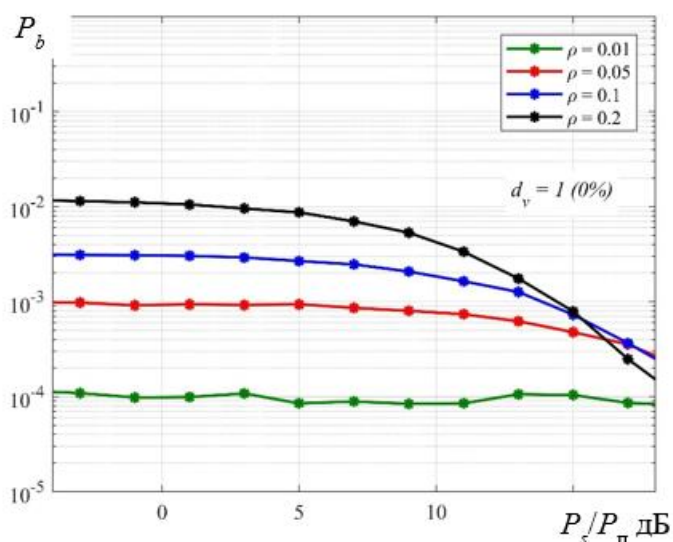


Рис. 4. Зависимость СВО на бит P_b от отношения сигнал/помеха при передаче сигналов в режиме внутрисимвольной ППРЧ ($L = 3$).

Из анализа полученных результатов следует, что по сравнению с традиционной посимвольной ППРЧ использование внутрисимвольной ППРЧ с рассмотренным алгоритмом приема сигналов позволило снизить СВО приема информации на порядок в условиях узкополосной шумовой помехи в части полосы с малой долей пораженной помехами полосы частот ($\rho = 0.01, 0.05$).

Стратегия постановщика помех базируется на реализации оптимального распределения своего энергетического ресурса по полосе частот, используемой для радиолиний связи. Необходимо отметить, что при воздействии наихудших узкополосных шумовых помех в части полосы СВО приема сигналов оказывается максимальной.

На рис. 5 показаны кривые помехоустойчивости приема сигналов ОФТ (DBPSK) в условиях наихудших узкополосных шумовых помех в части полосы при работе канала управления в режиме с посимвольной и внутрисимвольной ППРЧ с трехкратным внутрисимвольным разнесением символа ($L = 3$).

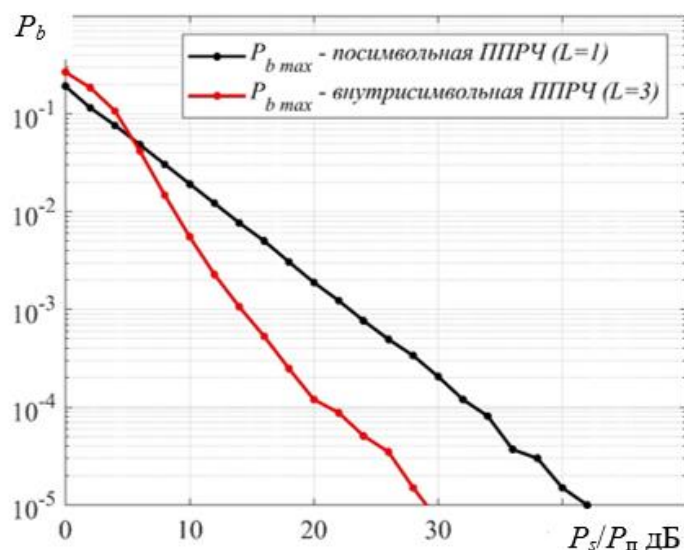


Рис. 5. Зависимость СВО на бит при приеме сигналов с ППРЧ от ОСП в условиях воздействия наихудших узкополосных шумовых помех.

Анализ результатов подтверждает вывод о том, что использование внутрисимвольной ППРЧ с рассматриваемым алгоритмом приема позволило обеспечить повышение помехоустойчивости передачи данных даже в условиях воздействия наихудших узкополосных шумовых помех в части полосы. В указанных условиях использование предложенного алгоритма некогерентного

приема ОФТ сигналов в режиме ППРЧ с трехкратным внутрисимвольным разнесением символа обеспечивает энергетический выигрыш в ОСП более 10дБ по сравнению с традиционной символьной ППРЧ.

На рис. 6 представлены результаты математического моделирования предложенного алгоритма некогерентного приема с погрешностью определения весовых коэффициентов ($d_v = 0.75$) (соответственно -25%). Результаты получены для случая передачи информации в режиме внутрисимвольной ППРЧ с ($L = 3$).

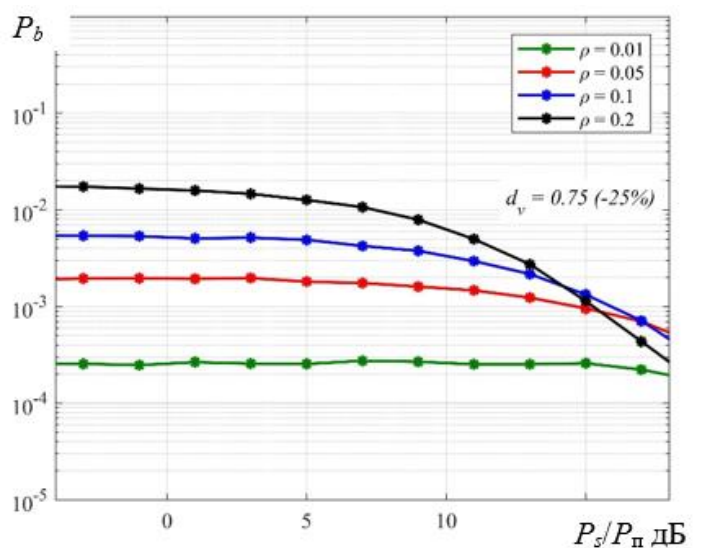


Рис. 6. Зависимость СВО на бит P_b от ОСП в режиме внутрисимвольной ППРЧ ($L = 3$) [погрешность определения весовых множителей ($d_v = 25\%$)].

Анализ результатов, представленных на рис. 4 и рис. 6, позволяет сделать вывод о том, что алгоритм приема сигналов с весовой обработкой ОФТ сигналов в режиме внутрисимвольной ППРЧ при наличии погрешностей определения весовых коэффициентов обеспечивает снижение вероятности битовой ошибки приема сигналов, сохраняя при этом своё свойство повышения помехоустойчивости в условиях узкополосных шумовых помех.

На практике для обеспечения более высокой степени помехозащищенности (сохранения устойчивости управления БПЛА) реализуется отключение сильно пораженных помехами каналов (частот). А это значит, что при обработке сигналов на основе реализации рассматриваемого

алгоритма приема влиянием сильно пораженных помехами символов можно пренебречь.

На рис. 7 представлены результаты математического моделирования канала передачи информации для режима внутрисимвольной ППРЧ с ($L = 3$) в условиях воздействия узкополосных шумовых помех с долей пораженной полосы частот ($\rho = 0.05, 0.1, 0.2$), а на рис.8 результаты показаны для случая воздействия наихудших узкополосных помех в части полосы.

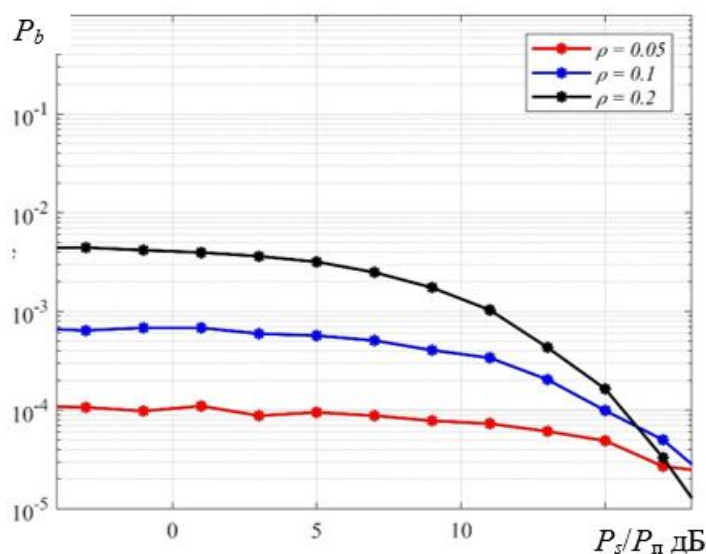


Рис. 7. Зависимость СВО на бит P_b от ОСП при передаче информации в режиме посимвольной ППРЧ.

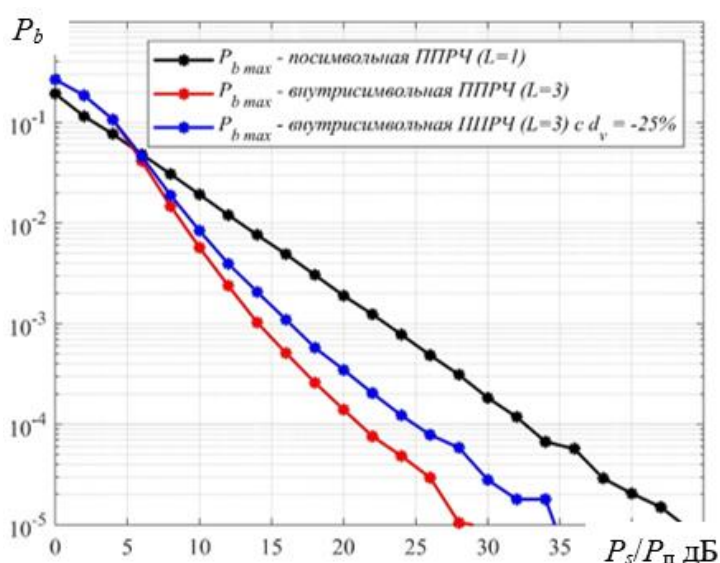


Рис. 8. Зависимость СВО P_b от ОСП в режиме внутрисимвольной ППРЧ ($L = 3$) в условиях наихудших узкополосных шумовых помех.

Из анализа полученных результатов следует, что при применении режима внутрисимвольной ППРЧ и реализации рассматриваемого алгоритма приема с исключением сильно пораженных помехами субсимволов при вынесении решения удаётся значительно снизить СВО на бит в области малых ОСП от 5 до 10 дБ (область с более мощной помехой по сравнению с сигналом ППРЧ). В указанных условиях из рис. 8 видно, что энергетический выигрыш от использования рассматриваемого алгоритма приема ОФТ сигналов с ППРЧ повышается на 5 дБ при заданной СВО, равной 10^{-4} .

Заключение

Использование режима передачи с псевдослучайной перестройкой рабочей частоты представляется эффективным способом обеспечения высокой помехоустойчивости передачи информации в условиях радиопротиводействия. Благодаря использованию алгоритма некогерентного приема сигналов ППРЧ с весовой обработкой рассматриваемый способ передачи информации с внутрисимвольной ППРЧ по сравнению с традиционной посимвольной ППРЧ обеспечивает более высокую помехоустойчивость как в условиях воздействия узкополосных шумовых помех (помех в части полосы), так и при воздействии наихудших шумовых помех.

Для обеспечения более высокой достоверности принятия правильного решения о передаче того или иного символа предлагается использовать в рассматриваемом алгоритме весовую обработку принятых разнесенных субсимволов. В этом случае весовые коэффициенты определяются обратно пропорциональными суммарной мощности сигналов и помех на $-m$ такте приема. Рассматриваемый алгоритм приема сигналов с ППРЧ сохраняет свою способность обеспечения снижения вероятности битовой ошибки приема сигналов при наличии ошибок вычисления весовых множителей. В рассматриваемом алгоритме с целью обеспечения более высокой степени достоверности передачи сигналов в условиях помех можно исключить из программы перестройки частоты, на которых наблюдается сильная помеха.

В результате влиянием сильно пораженных субсимволов на принятое решение можно пренебречь.

Литература

1. Борисов В.И., Зинчук В.М., Лимарев А.Е. и др. Помехозащищенность систем радиосвязи с расширением спектра сигналов методом псевдослучайной перестройки рабочей частоты. М.: Радио и связь, 2000. С. 20.
2. Макаренко С. И. Анализ средств и способов противодействия беспилотным летательным аппаратам. Часть 3. Радиоэлектронное подавление систем навигации и радиосвязи //Системы управления, связи и безопасности. – 2020. – №. 2. – С. 101-175. DOI: [10.24411/2410-9916-2020-10205](https://doi.org/10.24411/2410-9916-2020-10205).
3. Парамонов А.А., Хоанг Ван З. Прием сигналов относительной фазовой телеграфии с весовой обработкой субсимволов в системах передачи информации с псевдослучайной перестройкой рабочей частоты. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2020. №10. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2020.10.2>
4. Прокис Дж. Цифровая связь: пер. с англ. М.: Радио и связь, 2000. С. 670-681.
5. Хоанг В.З., Парамонов А.А. Анализ алгоритма адаптивного приема сигналов с ППРЧ в условиях радиопротиводействия //Актуальные проблемы и перспективы развития радиотехнических и инфокоммуникационных систем("Радиоинфоком-2022"). – 2022. – С. 217-221.

Для цитирования:

Парамонов А.А., Хоанг В.З. Способ повышения помехоустойчивости радиолинии связи в условиях деструктивного воздействия преднамеренных помех. // Журнал радиоэлектроники. – 2023. – №. 10. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2023.10.11>