

УДК 004

*В. В. Бабинцев, А. Л. Любимов, Д. А. Репкин, А. В. Частиков*

## **АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ СТРУКТУРНЫХ ПОМЕХ НА АДАПТИВНОЕ УСТРОЙСТВО БЫСТРОГО ПОИСКА ШПС**

Одним из направлений сокращения времени вхождения в кодовый синхронизм в системах передачи информации на основе шумоподобных сигналов (ШПС) является использование адаптивного устройства быстрого поиска ШПС. Для таких устройств высокую степень опасности представляют мощные сигналподобные помехи (СПП), которые по структуре похожи на полезный сигнал, но отличаются параметрами формирования. Источниками мощных СПП могут быть прямые и отраженные сигналы других абонентов. В статье проведен анализ влияния СПП на адаптивное устройство поиска ШПС. При различной интенсивности шума исследованы степень влияния базы, закона формирования, интенсивности и количества СПП, действующих на входе приемного устройства. Полученные результаты показывают, что потери в помехоустойчивости при неблагоприятных условиях могут достигать десяти и более децибел.

*Ключевые слова:* структурные помехи, адаптивное устройство быстрого поиска, шумоподобные сигналы.

В современных системах связи широкое распространение получили системы передачи информации (СПИ) на основе ШПС, формируемые на основе псевдослучайных последовательностей (ПСП). Применение кодового разделения позволило обеспечить одновременную работу абонентов в одной полосе частот, снизить требования к мощности передатчиков. Эффективность работы СПИ на базе ШПС, в значительной степени зависит от скорости вхождения в синхронизм принимаемого ШПС с его копией в приемном устройстве (ПУ).

Сократить время вхождения в кодовый синхронизм можно за счет использования информационной избыточности ПСП, заложенной в них при кодировании. В [1] получены оптимальные уравнения нелинейной фильтрации ШПС, построенных на двоичных линейных рекуррентных последовательностях максимального периода.

$$u_{k+1} = [f_{k+1}(\Phi_1) - f_{k+1}(\Phi_2)] + \hat{u}_k + z(\hat{u}_k, p_{ij}), \quad (1)$$

где  $u_{k+1} = \ln(p_{1(k+1)}/p_{2(k+1)})$  – логарифм отношения апостериорных вероятностей состояний дискретного параметра;  $\hat{u}_k = \text{sign}(\hat{\phi}_k)|u_k|$  – оценка  $\hat{u}_k$ , сформированная в ПУ на основе модуля  $|u_k|$  и знака  $\text{sign}(\hat{\phi}_k)$  в  $k$ -м такте, которая при отсутствии шума совпадает с  $u_{k+1}$ :

$$z(\hat{u}_k, p_{ij}) = \ln\left(\frac{p_{11} + p_{21} \exp\{-\hat{u}_k\}}{p_{22} + p_{12} \exp\{\hat{u}_k\}}\right), \quad i, j = 1, 2. \quad (2)$$

В [2] на основе уравнения (1) и метода наименьших квадратов получен алгоритм работы адаптивного ПУ:

$$u_{k+1} = [f_{k+1}(\Phi_1) - f_{k+1}(\Phi_2)] + \hat{u}_k + b''_{k+1} \hat{u}_k, \quad (3)$$

$$\hat{p}_{ij(k+1)} = \begin{cases} \hat{p}_{ij(k)} + \Delta p_{ij}, & \text{при } \text{sign}(u_{k+1}) = \text{sign}(\hat{u}_k), \\ \hat{p}_{ij(k)} - \Delta p_{ij}, & \text{при } \text{sign}(u_{k+1}) \neq \text{sign}(\hat{u}_k), \end{cases} \quad (4)$$

где  $b''_{k+1} = z(\hat{u}_k, \hat{p}_{ij})/\hat{u}_k$  с диапазоном возможных изменений  $-1 \leq b''_{k+1} \leq 0$ .

Исходное значение  $b''_{k+1}$  выбирается путем задания начальной вероятности  $p_{ij}^H$ .

В соответствии с уравнением (3) и правилом адаптации (4) было синтезировано [2] адаптивное устройство быстрого поиска (АУБП) ШПС, структура которого представлена на рис.1.

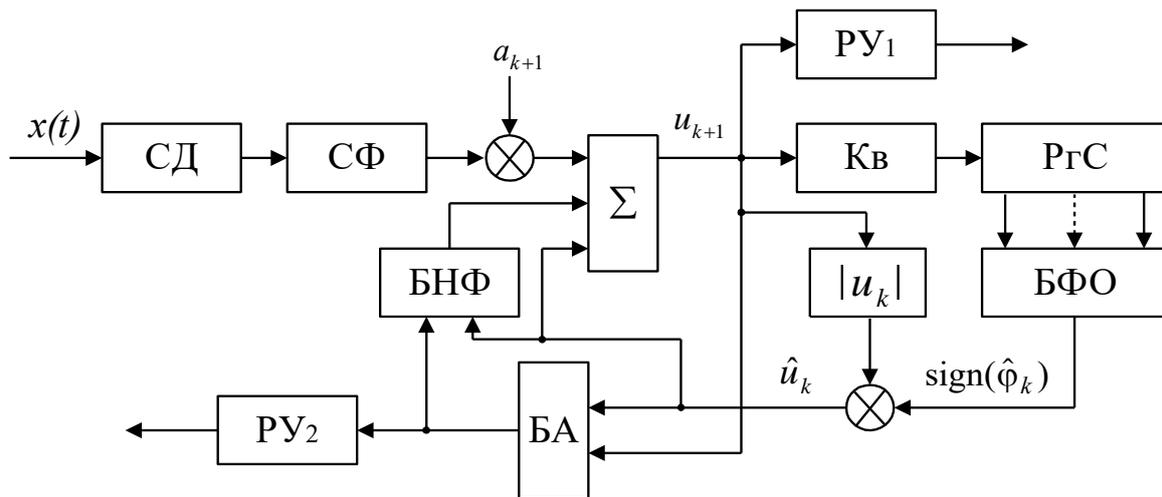


Рис. 1. Адаптивное ПУ для быстрого поиска ШПС

Адаптивное устройство состоит из синхронного детектора СД, фильтра СФ, согласованного с элементарным сигналом одного символа ПСП, нелинейного фильтра (НФ), умножителя на весовой коэффициент  $a_{k+1}$ , блока адаптации БА, который на основе выработанного значения  $\hat{p}_{ij}$  управляет блоком вычисления функции  $z(\hat{u}_k, \hat{p}_{ij})$  и решающих устройств РУ<sub>1</sub> и РУ<sub>2</sub>.

НФ, содержит: сумматор  $\Sigma$ , квантователь Кв,  $m$ -разрядный сдвигающий регистр РГС, хранящий  $m$  значений дискретного параметра ШПС, отфильтрованных за предыдущие  $(k - m)$  тактов для вычисления оценки знака  $\hat{u}_k$ , блок формирования оценки знака (БФО)  $\text{sign}(\hat{\phi}_k)$ , блок вычисления нелинейной функцией (БНФ)  $z(\hat{u}_k, \hat{p}_{ij})$ . Комбинационная схема БФО формирует оценку знака  $\hat{u}_k$  в соответствии с заданным законом кодирования ПСП. Знак присваивается значению  $|u_k|$ , формируемому на выходе блока вычисления задержанного на такт значения абсолютной величины  $|u_k|$ . Вычисление величины  $z(\hat{u}_k, \hat{p}_{ij})$  производится блоком вычисления нелинейной функции (БНФ). Разность логарифмов функции правдоподобия  $f_{k+1}(\Phi_1) - f_{k+1}(\Phi_2)$ , соответствующая очередному принимаемому символу и вычисленные значения  $\hat{u}_k$  и  $z(\hat{u}_k, \hat{p}_{ij})$  поступают на вход сумматора  $\Sigma$ .

НФ содержит:  $m$ -разрядный сдвигающий регистр РгС, хранящий  $m$  значений дискретного параметра ШПС, отфильтрованных за предыдущие  $(k - m)$  тактов для вычисления  $\text{sign}(\hat{\phi}_k)$ , устройство вычисления  $z(\hat{u}_k, \hat{p}_{ij})$ , линию задержки ЛС (регистр) и сумматор  $\Sigma$ .

Блок адаптации в каждом такте работы системы, начиная с  $(m + 1)$ -го, сравнивает значения  $\phi_{k+1}$  и  $\hat{\phi}_k$ . По результату сравнения производится изменение оценки  $\hat{p}_{ij}$  с заданным шагом  $\Delta p_{ij}$ . При появлении ШПС на входе ПУ количество совпадений  $\phi_{k+1}$  и  $\hat{\phi}_k$  увеличивается, при этом  $\hat{p}_{ij}$  растет, стремясь к предельному значению  $p_{ij}^{\text{п}} = 1$ . Скорость адаптации зависит от выбранного шага  $\Delta p_{ij}$ , отношения сигнал-шум  $\rho_s^2$  на входе ПУ и длины  $m$ -значной комбинации символов ПСП.

В решающем устройстве РУ<sub>1</sub> в соответствии с выбранным критерием оптимальности выносятся решение о наличии или отсутствии ШПС. Другим условием завершения работы АУБП является достижение параметра адаптации максимального значения  $\hat{p}_{ij} = 1$  (кодированная комбинация в регистре РгС считается исходной кодированной комбинацией для генератора копии ПСП).

В реальных условиях АУБП работают в сложной помеховой обстановке. Установлено [3, 4], что для СПИ с ШПС очень опасными являются мощные структурные помехи (СП), которые по структуре похожи на полезный сигнал, но отличаются параметрами формирования. В СПИ с ШПС, помехи этого типа, например, прямые и отраженные сигналы других абонентов СПИ, встречаются наиболее часто. Источником мощных структурных помех, например, ретранслированных, могут быть системы радиотехнического противодействия.

Для разработки методов эффективной борьбы с ПП, необходимо определить степень влияния этих помех на АУБП ШПС.

Структура СП, несмотря на свое подобие искомому ШПС, оказывается не согласованной с нелинейным фильтром АУБП, и поэтому лишь часть энергии

СП проходит на выход ПУ. Структурные особенности ПСП помехи, отличающихся в различной степени от ПСП искомого ШПС (длиной периода ПСП, правилом формирования ПСП и т.п.), могут по-разному влиять на помехоустойчивость приема искомого ШПС. Будем считать, что СП, действующие на входе АУБП, являются независимыми и представляют собой ШПС, построенные на рекуррентных ПСП максимального периода с  $m_{СПq} (q = \overline{1, Q})$  и отличными от искомого ШПС законами формирования.

В таком предположении сигнал на входе АУБП представляет собой аддитивную смесь вида

$$x(t_k) = S(t_k) + \sum_{q=1}^Q S_q^{СП}(t_k) + n(t_k), \quad (5)$$

где  $S(t_k)$  – искомый ШПС,  $S_i^{СП}(t_k)$  –  $i$ -я СП,  $n(t_k)$  – белый гауссовский шум.

Будем считать, что искомый ШПС и СП сформированы на основе двоичных рекуррентных ПСП максимального периода и отличаются только структурой и периодом ПСП.

Степень влияния структуры СП на помехоустойчивость АУБП иллюстрирует график на рис. 2.

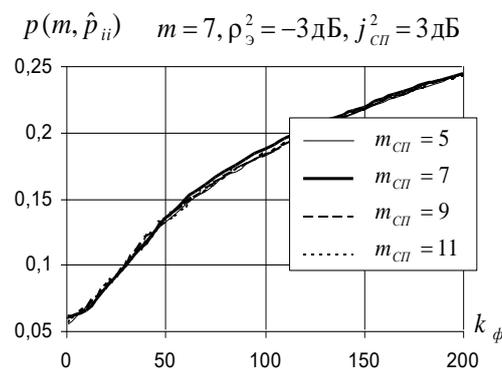


Рис. 2. Зависимость вероятности распознавания  $p(m, \hat{p}_{ii})$  от  $m_{СП}$

Для случая  $m = 7$  на рис. 2 приведены кривые при действии СП с различными значениями  $m_{СП} = 5, 7, 9, 11$  которые практически совпадают друг

с другом. Отсюда можно сделать вывод, что Структура (закон формирования) СП практически не влияет на вероятность распознавания полезного сигнала  $p(m, \hat{p}_{ii})$ .

На рис. 3 представлены графики зависимостей вероятности распознавания  $m$ -значных комбинаций символов ПСП искомого ШПС на выходе АУБП при  $m=7$  и  $m_{СП} = 11$ , отношении сигнал–шум  $\rho_s^2 = -3$  дБ и различных отношениях помеха–сигнал  $j_{СП}^2 = 0, 3, 6, 9, 12$  дБ. Графики справа характеризуют потери  $\ell$  на выходе АУБП от действия СП.

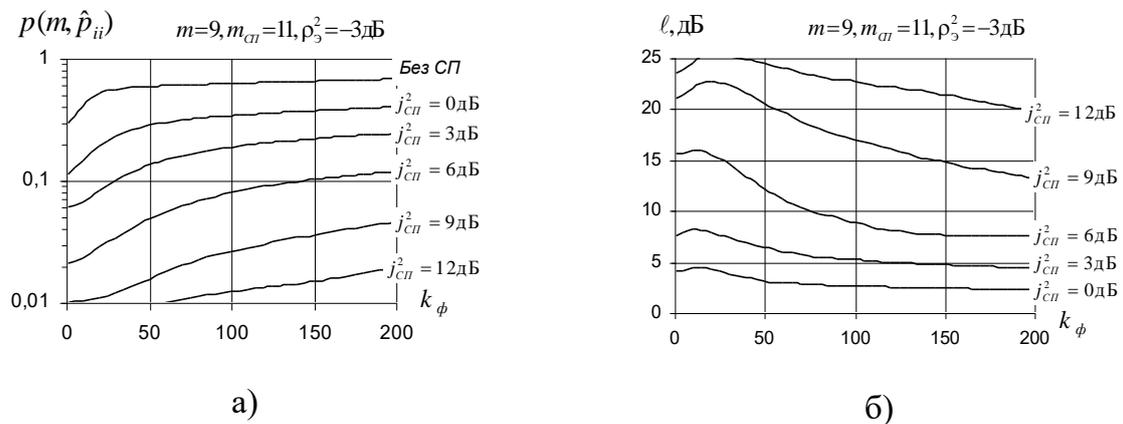


Рис. 3. Зависимость вероятности распознавания  $p(m, \hat{p}_{ii})$  от мощности СП

Анализ графиков рис. 3 показывает, что с увеличением степени превышения интенсивности СП над интенсивностью ШПС помехоустойчивость АУБП падает, что подтверждает эффект подавления мощной СП более слабого искомого ШПС. На начальных тактах фильтрации потери в помехоустойчивости  $\ell$  сначала незначительно возрастают, а затем снижаются на 3–8 дБ.

На рис. 4а,б представлены графики вероятности распознавания  $p(m, \hat{p}_{ii})$  на выходе адаптивного АУБП при различных отношениях  $\rho_s^2 = 0, -3, -6$  дБ и фиксированных значениях помеха–сигнал  $j_{СП}^2 = 0$  и 6 дБ.

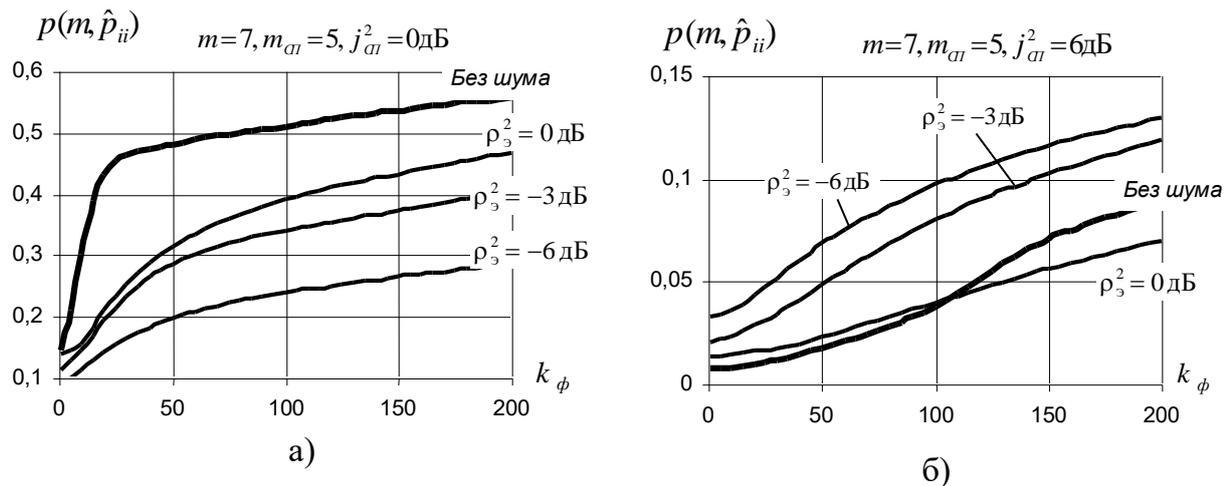


Рис. 4. Зависимость вероятности распознавания  $p(m, \hat{p}_{ii})$  от числа тактов при действии СП и шума различной интенсивности

На графиках для сравнения проведена зависимость вероятности  $p(m, \hat{p}_{ii})$ , соответствующая случаю малого уровня шумов – при отношении сигнал–шум много больше единицы (кривая с большей шириной). Из анализа графиков следует, что при действии СП, превышающей по мощности искомый ШПС, увеличение интенсивности шума до уровня, сравнимого с интенсивностью СП, приводит за счет разрушения структуры СП к меньшему влиянию СП на снижение помехоустойчивости АУБП, чем при малом уровне шумов.

На рис. 5а,б представлены соответственно зависимости вероятности распознавания и потерь в помехоустойчивости  $\ell$  от мощности СП при  $m = 7$ ,  $m_{CI} = 11$  для значений  $\rho_s^2 = -12, -6, 0, 6$  и  $12$  дБ.

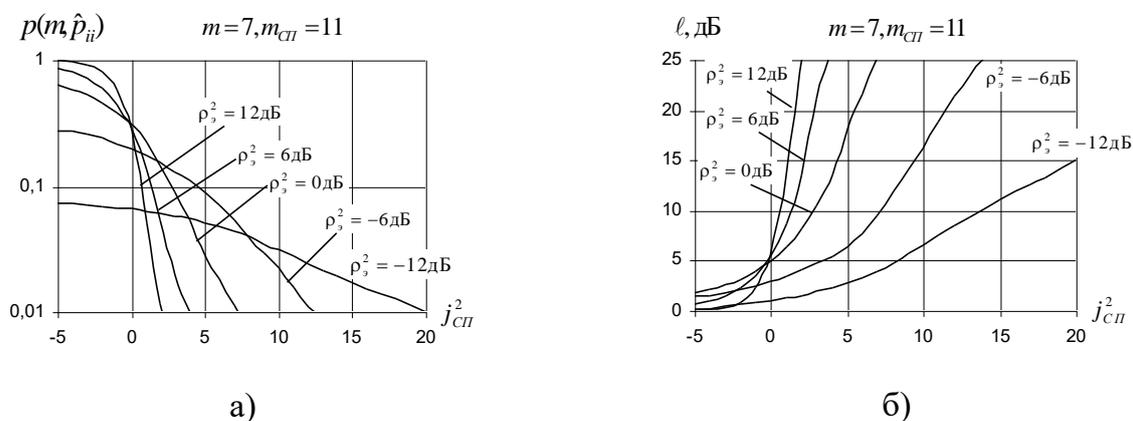


Рис. 5. Зависимость вероятности  $p(m, \hat{p}_{ii})$  и потерь  $\ell$  от величины  $j_{CI}^2$

Анализ графиков показал, что чем больше значение отношения сигнал–шум  $\rho_s^2$ , тем быстрее снижается вероятность распознавания  $p(m, \hat{p}_{ii})$ , а, следовательно быстрее растут потери в помехоустойчивости  $\ell$  с ростом отношения помеха–сигнал.

Помехоустойчивость АУБП в условиях воздействия СП различной мощности в зависимости от мощности шума для  $m = 7$  и  $m_{СП} = 11$  иллюстрируется графиками вероятности распознавания  $p(m, \hat{p}_{ii})$  и потерь  $\ell$ , помещенными на рис. 6а,б соответственно. Для проведения сравнений на рис. 6а помещен график, соответствующий воздействию только шума.

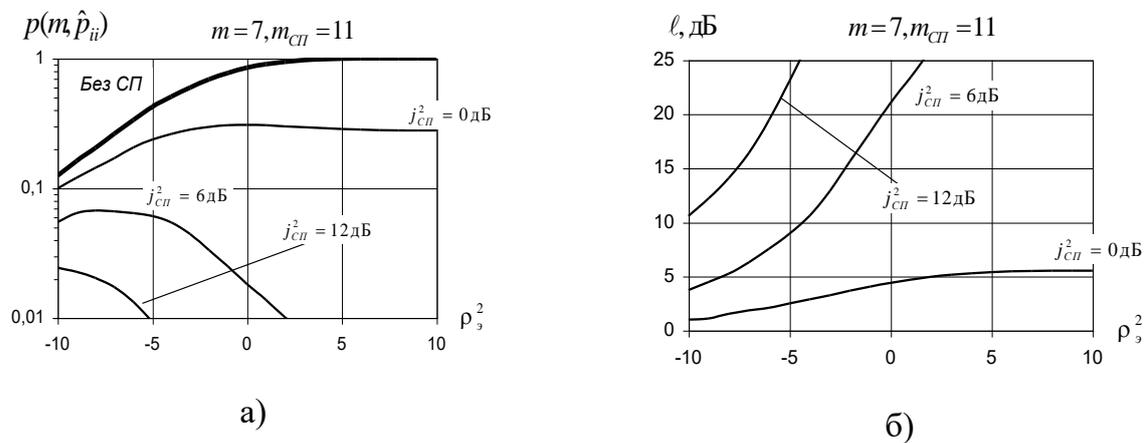


Рис. 6. Зависимость вероятности распознавания  $p(m, \hat{p}_{ii})$  и потерь в помехоустойчивости  $\ell$  от отношения сигнал–шум  $\rho_s^2$

Графики на рис. 6 подтверждают очевидный факт снижения вероятности распознавания  $p(m, \hat{p}_{ii})$  и роста потерь в помехоустойчивости  $\ell$  с ростом мощности СП. При превышении мощности СП над мощностью шума, вероятность распознавания снижается с ростом отношения сигнал–шум вследствие слабого влияния шума на изменение структуры СП.

Рассмотренные графики иллюстрируют помехоустойчивость АУБП в условиях воздействия только одной СП, однако в реальных условиях на входе АУБП могут присутствовать несколько СП с различной структурой и интенсивностью.

На рис. 7 представлены графики вероятности распознавания  $m$ -значных комбинаций  $p(m, \hat{p}_{ii})$  символов ПСП на выходе АУБП и соответствующие им графики потерь  $\ell$  от воздействия двух СП в зависимости от отношения сигнал-шум  $\rho_9^2$  при отношениях помеха-сигнал  $j_{СП}^2 = 6, 12$  и  $18$  дБ для степеней первообразующего полинома: ПСП –  $m = 7$ , помех –  $m_{СП} = 5$  и  $9$ .

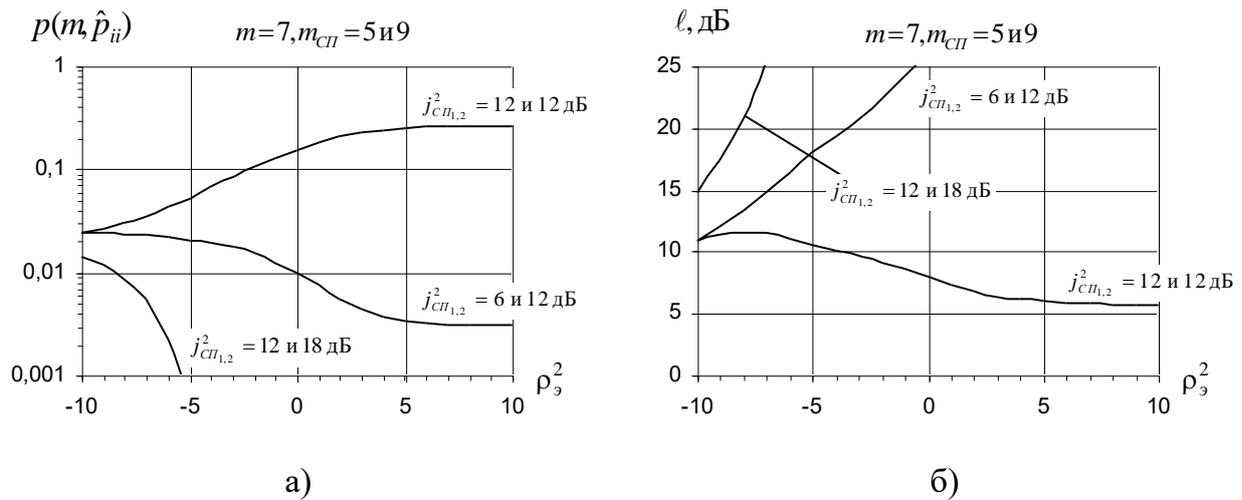


Рис. 7. Зависимость вероятности распознавания  $p(m, \hat{p}_{ii})$  от  $\rho_9^2$

Из анализа графиков следует, что с ростом отношения сигнал-шум  $\rho_9^2$  при действии СП с различными интенсивностями вероятность распознавания  $p(m, \hat{p}_{ii})$  снижается, а потери  $\ell$  возрастают, что объясняется ослаблением влияния шума на структуру СП. В случае равенства интенсивностей обеих СП, вероятность распознавания  $p(m, \hat{p}_{ii})$  с ростом отношения сигнал-шум возрастает вследствие взаимной компенсации разнополярных элементов СП.

На рис. 8 представлены графики зависимостей вероятности распознавания  $m$ -значных комбинаций символов ПСП искомого ШПС и соответствующие им графики потерь  $\ell$  в зависимости от отношения помеха-сигнал  $j_{СП_1}^2$  одной из СП при  $m = 7$ ,  $m_{СП} = 5$  и  $9$ , отношении сигнал-шум  $\rho_9^2 = 0$  дБ и фиксированных отношениях помеха-сигнал второй СП  $j_{СП_2}^2 = 5, 10, 15$  и  $20$  дБ.

Анализируя графики на рис. 8 можно заметить, что при равенстве мощностей СП<sub>1</sub> и СП<sub>2</sub> наблюдается резкий подъем вероятности распознавания  $p(m, \hat{p}_{ii})$  и, соответственно, снижение потерь  $\ell$  из-за взаимной компенсации разнополярных элементов СП. Уменьшение ширины “впадин” на графиках потерь с ростом отношения помеха–сигнал объясняется ослаблением влияния шума на структуру СП с увеличением интенсивностей помех.

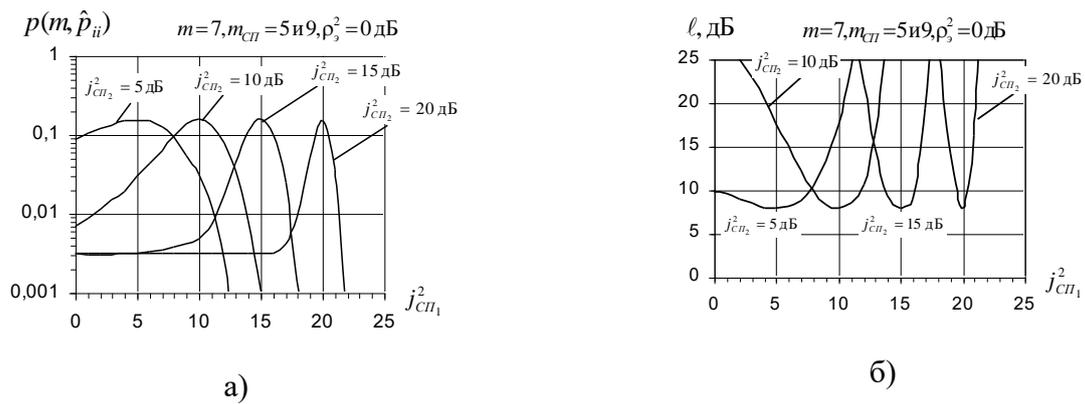


Рис. 8. Зависимость вероятности распознавания  $p(m, \hat{p}_{ii})$  от мощности СП<sub>1</sub> для случая действия двух СП

Чтобы проследить тенденцию влияния числа СП на помехоустойчивость АУБП были проведены исследования при наличии трех СП. На рис. 9 представлены графики вероятности распознавания  $p(m, \hat{p}_{ii})$  на выходе АУБП и соответствующие им графики потерь  $\ell$  от воздействия трех СП в зависимости от отношения помеха–сигнал одной из СП  $j^2_{СП1}$  при величине отношения сигнал–шум  $\rho_s^2 = 0$  дБ и фиксированных значениях помеха–сигнал  $j^2_{СП2,3} = 9, 12, 15, 18$  и 21 дБ.

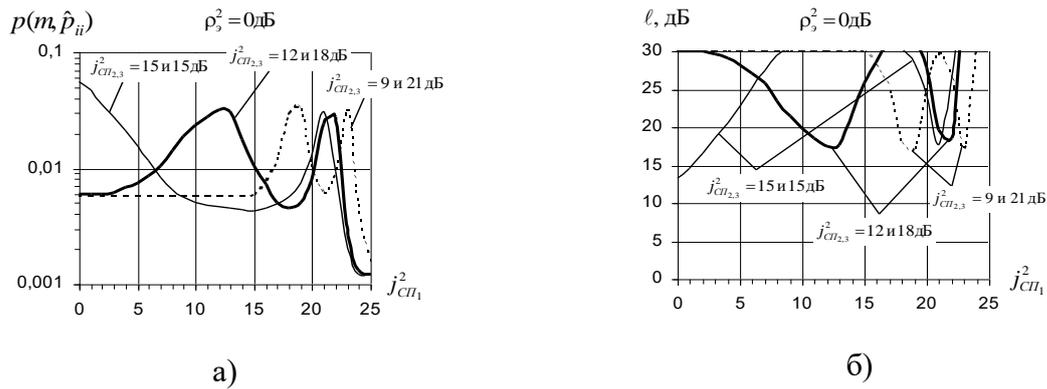


Рис. 9. Зависимость вероятности распознавания  $p(m, \hat{p}_{ii})$  от мощности СП<sub>1</sub> для случая действия трех СП

Можно отметить, что при некоторых соотношениях значений мощностей СП<sub>1</sub>, СП<sub>2</sub> и СП<sub>3</sub> возможен резкий подъем вероятности распознавания  $p(m, \hat{p}_{ii})$  и снижение потерь вследствие комбинаторной компенсации элементов трех помех при определенных соотношениях их мощностей. Следовательно, исследования воздействия большего числа СП не имеет смысла из-за сложного характера взаимодействия СП друг с другом.

### Список литературы

1. Частиков А. В. Нелинейная фильтрация шумоподобных сигналов, построенных на рекуррентных псевдослучайных последовательностях максимального периода // Радиотехника и электроника. 2001. Т. 46. № 9. С. 1032–1038.
2. Частиков А. В., Петров Е. П. Метод адаптивной фильтрации двоичных импульсных коррелированных сигналов // Радиотехника и электроника. 2001. Т. 46. № 10. С. 1155–1158.
3. Помехозащищенность радиосистем со сложными сигналами / Г. И. Тузов, В. А. Сивов, В. И. Прытков и др.; под ред. Г. И. Тузова. М.: Радио и связь. 1985. 264 с.
4. Милстайн Л. Б. Методы подавления помех в системах радиосвязи с широкополосными сигналами // ТИИЭР. 1988. Т. 76. № 6. С. 19–36.

**БАБИНЦЕВ Владимир Васильевич** – кандидат технических наук, заместитель начальника службы, УФСКН России по Кировской области. 610000, г. Киров, улица Ленина, 100А.

E-mail: vova\_kirov@rambler.ru

**ЛЮБИМОВ Александр Леонтьевич** – старший преподаватель кафедры радиоэлектронных средств, Вятский государственный университет. 610000, г. Киров, ул. Московская, 36.

E-mail: usr01201@vyatsu.ru

**РЕПКИН Дмитрий Александрович** – кандидат технических наук, доцент, и.о. декана факультета автоматики и вычислительной техники, Вятский государственный университет. 610000, г. Киров, ул. Московская, 36.

E-mail: repkin@vyatsu.ru

**ЧАСТИКОВ Александр Вениаминович** – доктор технических наук, профессор кафедры радиоэлектронных средств, Вятский государственный университет. 610000, г. Киров, ул. Московская, 36.

E-mail: chastikov@vyatsu.ru