

УДК 517.9

А.С. Попов, Р.В. Иваненко, А.С. Корсунский

## ВЛИЯНИЕ ПРЕДНАМЕРЕННЫХ И НЕПРЕДНАМЕРЕННЫХ ПОМЕХ НА ОБНАРУЖЕНИЕ ИМПУЛЬСНЫХ СВЕРХШИРОКОПОЛОСНЫХ СИГНАЛОВ

**Попов Андрей Сергеевич**, окончил Рязанский государственный радиотехнический университет. Адъюнкт кафедры «Общепрофессиональные дисциплины» Военной академии связи им. С.М. Буденного. Имеет статьи в области обработки сигналов, статистической теории принятия решений, передачи информации по беспроводным каналам связи информационных систем. [e-mail: koks85230@mail.ru].

**Иваненко Роман Васильевич**, окончил Рязанское высшее военное командное училище связи. Начальник военной кафедры Рязанского государственного радиотехнического университета. Имеет учебные пособия, статьи в области передачи информации в военных системах управления, цифровой обработки сигналов. [e-mail: koks85230@mail.ru].

**Корсунский Андрей Сергеевич**, кандидат технических наук, окончил факультет радиосвязи Ульяновского филиала Военного университета связи, адъюнктуру Военной академии связи им. С.М. Буденного. Ведущий инженер-программист ФНПЦ ОАО «НПО «Марс». Имеет статьи и изобретения в области радиоэлектронной защиты, безопасности связи и информации, а также в области передачи информации по беспроводным каналам связи информационно-телекоммуникационных систем. [e-mail: aksspb@mail.ru].

### Аннотация

Рассмотрены потенциальные характеристики импульсных сверхширокополосных сигналов (ИСШПС). Основное внимание уделено системе обнаружения сигналов. Предложен блок обнаружителя с адаптацией порога при изменении уровней сигнала и шума. Исследованы вопросы влияния различного вида помех на систему обнаружения, позволяющие говорить о высоком уровне помехозащищенности ИСШП систем беспроводного доступа.

Ключевые слова: импульсные сверхширокополосные сигналы, система обнаружения сигналов, преднамеренные и непреднамеренные помехи.

**Andrey Sergeevich Popov**, graduated from Ryazan State Radioengineering University; post-graduate student of the Chair 'General Disciplines' at the Military Communications Academy named after S. Budenny; author of articles in the field of signal processing, statistic decision-making theory as well as data transmission through wireless data links of information systems. e-mail: koks85230@mail.ru.

**Roman Vasilyevich Ivanenko**, graduated from Ryazan Higher Military Communications Command College; head of the Military Chair at Ryazan State Radioengineering University; author of tutorials, articles in the field of data transmission in military-purpose control systems, digital signal processing. e-mail: koks85230@mail.ru.

**Andrey Sergeevich Korsunsky**, Candidate of Engineering; graduated from the Faculty of Radio-Communications of Ulyanovsk branch of the Military Communications University; completed his post-graduate program at the Military Communications Academy named after S. Budenny; lead programmer at Federal Research-and-Production Center 'Research-and-Production Association 'Mars'; author of articles and inventions in the field of radioelectronic protection, communications and information security as well as data transmission through wireless communications channels of infotelecommunication systems. e-mail: aksspb@mail.ru.

### Abstract

The article deals with potential characteristics of pulsed ultra-broadband signals. It gives a principal consideration to a system for signal detection and suggests a bloc of detector with adaptation of threshold when changing signal and noise levels. The authors have researched into issues of different-interference impact on detection system. The different types of interference allowed speaking about a high level of noise immunity of pulsed ultra-broadband signals of wireless-access systems.

Key words: pulsed ultra-broadband signals, signal-detection system, malicious and unintended interference.

ВВЕДЕНИЕ

Анализ телекоммуникационных и информационных потребностей пользователей различного рода объектовых систем связи показывает, что возникает неопределенность их функционирования, обусловленная непредсказуемостью воздействия мешающих факторов. Следует отметить, что в условиях информационного конфликта эффективность систем передачи информации в значительной степени зависит от качества функционирования радиоэлектронных средств (РЭС), к которым предъявляются всё более высокие требования (повышение помехоустойчивости, скрытность, электромагнитная совместимость и т.д.) [1, 2].

Для выполнения поставленных требований разработки РЭС идут либо по пути улучшения технических характеристик узкополосных систем, либо используют новые технологии, например, основанные на применении ИСШПС. Подобные системы способны более успешно, чем узкополосные, решать следующие задачи: обнаружение и распознавание объектов (радиолокация); повышение объёма и скрытности передачи данных в радиосвязи; увеличение точности местоопределения в навигации. Главное преимущество ИСШП систем состоит в том, что спектральная плотность энергии сигнала UWB не превышает определенного значения ( $10^{-4} - 10^{-2}$  мВт/МГц). В данной технологии при увеличении дальности спектральная плотность мощности может увеличиваться в 3-5 раз, что неизмеримо ниже аналогичного показателя для классических радиointерфейсов (Wi-Fi, Bluetooth и так далее). По этой причине для всех остальных не-UWB-устройств сверхширокополосный сигнал просто смешивается с массой другого «электронного» шума, и возможные помехи можно считать пренебрежимо малыми [3].

В радиосвязи на основе ИСШПС принципиально поновому решается задача защиты информации от ее несанкционированного прослушивания и перехвата. Это достигается за счет очень низкой спектральной плотности излучаемых сигналов (табл. 1), что и обеспечивает очень высокий уровень их энергетической скрытности. Таким образом, актуальной является задача построения устройств обнаружения сигналов, позволяющих обеспечивать функционирование многопользовательских беспроводных систем на основе ИСШПС в соответствии с заданными требованиями.

Подход к ПОСТРОЕНИЮ БЛОКА ОБНАРУЖИТЕЛЮ с АДАПТАЦИЕЙ ПОРОГОВ

В качестве обнаружителя выберем энергетический обнаружитель или радиометр, обеспечивающий поиск и обнаружение в условиях априорной неопределенности, имеющей место в реальных задачах [4]. Алгоритм обнаружения заключается в сравнении порога со значением функции неопределенности модулированного ИСШПС [5].

Обнаружение сигнала в основном осуществляется по наличию пика, превышающего некоторый порог. Тогда эффективность обнаружения будет зависеть от правил выбора порога. Величина порога обнаружения зависит от длительности сигнала (времени анализа) и определяется отношением сигнал-шум на входе порогового устройства. Если это отношение известно точно, то величина порога обнаружения может быть выбрана оптимально исходя из требуемой вероятности ложного срабатывания (или пропуска сигнала). В этом случае порог может быть фиксированным, превышение его модулем функции неопределенности свидетельствует об обнаружении основного пика тела неопределенности. Тогда основные характеристики системы обнаружения (вероятность ложного срабатывания  $F$  и вероятность пропуска сигнала  $D$ ) определяются следующим образом [6]:

$$F_q = 0,5 \{1 - \text{erf}[(\Pi \theta \lambda_q \sqrt{N P})]\}, \quad (1)$$

$$D = 0,5 \{1 - \text{erf}[(1 - \Pi_0) \sqrt{N P}]\}, \quad (2)$$

где  $p$  - отношение сигнал-шум;

$N_c$  - количество элементов в сигнале;

$X_q$  - нормированное значение максимального бокового пика ( $|X_q| < 1$ );

$\Pi_0$  - нормированный порог обнаружения;

$$\text{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x \exp(-t^2) dt - \text{функция Крампа.}$$

В условиях изменяющегося или неизвестного отношения сигнал-шум фиксированное значение порога обнаружения может привести к пропуску сигнала или к ложному срабатыванию. Поэтому в обнаружителях должна быть предусмотрена адаптация порога обнаружения при изменении уровней сигнала и шума. Совокупность этих средств образует блок формирования порога

Таблица 1

Основные характеристики стандартов беспроводных сетей

Технология	Стандарт	Пропускная способность	Средняя спектральная плотность сигнала	Радиус действия	Частоты
Wi-Fi	802.11a/b/g	До 54 Мбит/с	~10 мВт/МГц	до 100 м	2,4, 5,1 ГГц
UWB MB-OFDM	802.15.3a	110-480 Мбит/с	~ $10^{-4}$ мВт/МГц	до 10 м	3-10 ГГц
4G	GPP Long Term Evolution	До 172 Мбит/с	~20 мВт/МГц	до 3 км	700 МГц, 2,7 ГГц
СШПС-Импульс	802.15.4a	До 1000 Мбит/с	$10^{-2}$ мВт/МГц	до 10 км	Без несущей

обнаружения. В частности, в [6] предлагается использовать значение модуля функции неопределенности вне полосы принимаемого сигнала в качестве эталона шума. Такое решение не всегда оптимально, так как вне полосы принимаемого сигнала могут находиться искусственные помехи, и тогда оценка уровня шума окажется ошибочной. Следует также отметить сложность практической реализации этого метода в ИСШП системах связи из-за широкой полосы частот.

В работе [5] показано, что на правильность обнаружения существенное влияние оказывают уровни боковых пиков тела неопределенности. Согласно формуле (1) значение уровня боковых пиков влияет на вероятность ложного срабатывания. Для СШП сигналов нормированное значение боковых пиков находится примерно на уровне 0,4 от основного пика. Данное соотношение можно понизить при одновременном уменьшении вычислительной сложности. Для этого необходимо заменить блок вычисления модуля функции неопределенности на блок «квадратор» [7]. Это предоставляется возможным реализовать для ИСШП системы исходя из отсутствия фазы колебания и несущей частоты как таковой [8].

В инженерном отношении такой переход уменьшает вычислительную сложность, т.к. исключается выполнение затратной операции взятия квадратного корня. Форма основного пика во временной области теряет треугольную форму, но для нахождения максимума основного пика это не играет существенной роли. При возведении в квадрат максимальные боковые пики становятся меньше и снижают вероятность неоднозначности отсчета.

Рассмотрим структурную схему решающего устройства, реализующего адаптацию порога обнаружения за счет вычисления квадрата функции неопределенности (рис. 1).

На вход блока «выбора максимального значения» поступает квадрат функции взаимной неопределенности между входным сигналом и сигналом, записанным в согласованном фильтре. Стоит заметить, что отношение сигнал-шум и уровень сигнала неизвестны. Даже в случае присутствия сигнала на входе блока «вычисления квадрата функции взаимной неопределенности» поиск основного пика в трехмерном пространстве является весьма сложной и затратной в вычислительном плане задачей. Если учесть, что блок должен работать непрерывно, то задача еще более усложняется. Для упрощения задачи целесообразно сделать переход из трехмерного пространства в двумерную плоскость. Данную операцию и выполняет блок «выбора максимального значения». Рассматриваемый блок выполняет еще одну важную роль - усреднение входного шума при отсутствии сигнала. Задача поиска сигнала должна решаться постоянно на каждом отсчете с

учетом уровней шума и сигнала. В любом случае необходим некий порог, при превышении которого фиксируется наличие основного пика тела неопределенности. Для решения задачи предлагается использовать динамический порог, т. е. порог, меняющийся в зависимости от уровня сигнала в данный момент времени. Функция порога в данном случае является динамической.

Невозможность фиксации точного значения порога объясняется различными требованиями к системе ИСШПС. Для различного рода трафика (речь, данные, видео) мультисервисной сети предусматриваются разные значения порога.

В отличие от метода формирования порога, рассмотренного в [6], предлагается формировать порог из сигнала на выходе блока «выбора максимального значения». При этом используются такое свойство модулированных ИСШПС, как значительное превышение основного пика над боковыми пиками, а также то, что проекция квадрата функции неопределенности на временную плоскость представляет собой некоторое основание, спадающее к краям плоскости неопределенности. На этом основании резко выражен основной пик, достаточно узкий по сравнению с длиной основания. Следует заметить, что подобную форму сигнала и размеры основного пика могут дать и мешающие сигналы, но только в случае близости к сигналу, записанному в качестве импульсной характеристики согласованного фильтра. Тогда в качестве динамического порога можно использовать сигнал на выходе блока «выбора максимального значения», прошедший через фильтр скользящего среднего и умноженный на некоторую константу, при этом необходимо корректно выбрать интервал усреднения и коэффициент усиления.

Фильтр скользящего среднего не является оптимальным, но он наиболее легко реализуем и обладает минимальной вычислительной сложностью. Благодаря простоте реализации, фильтр скользящего среднего может обеспечить достаточно высокий порядок фильтрации.

В связи с тем, что фильтр вносит задержку сигнала, функция порога (форма сигнала после блока «формирования порога») будет отставать от сигнала на входе данного блока. Для согласования функции порога и сигнала необходимо задержать сигнал на длительность половины длины фильтра усреднения. В этом случае усредненный отсчет (отсчет функции порога) вычисляется как среднее значение некоторого числа отсчетов сигнала на выходе блока «задержки сигнала». Математическая запись функции порога с учетом постоянного коэффициента имеет вид:

$$g = k \frac{1}{N} \sum_{f - N/2}^{N/2} X_{f'}^2 \quad (3)$$



Рис. 1. Структурная схема решающего устройства

где  $g_i$  - значение отсчета на выходе блока «формирования порога»;

$u_i$  - значение отсчета на выходе блока «задержки сигнала»;

$N$  - длина фильтра скользящего среднего;

$K$  - постоянный коэффициент.

Для реализации динамического порога необходимо выбрать интервал усреднения (длину фильтра скользящего среднего)  $N$  и постоянный коэффициент усиления  $K$ .

При фиксированном коэффициенте усиления  $K$  и увеличении времени усреднения  $N$  (увеличении длины фильтра скользящего среднего) порог становится менее «реагируемым» на отдельные «выбросы» проекции функции неопределенности на временную плоскость, в том числе и на основной пик. В этом случае вероятность пропустить основной пик уменьшается (вероятность пропуска сигнала), но вероятность работы (пуска) от случайного «выброса» шума или помехи увеличивается (вероятность ложного срабатывания), и наоборот. Можно провести аналогию при фиксации длины фильтра и изменении коэффициента усиления  $K$ . На рисунке 2 показаны функции порогов, полученные при постоянном коэффициенте усиления и различных длинах усреднения.

В условиях искусственных помех функция порога, вычисляемая на большей длине усреднения, будет менее устойчива к «выбросам» функции взаимной неопределенности. Однако при большом усреднении возможно повышение коэффициента усиления без значительного увеличения вероятности пропуска сигнала.

Если рассматривать воздействие только сигнала, оптимальный интервал усреднения равен удвоенной длительности входного сигнала, за пределами  $2T$ , где  $T$  - длительность сигнала на входе, проекция функции

неопределенности на временную плоскость равна нулю. Тогда оптимальный интервал усреднения можно принять равным  $2T$ . Можно сказать, что при интервале усреднения  $2T$  динамический порог имеет минимальный отклик на основной пик. Однако необходимо учитывать, что при увеличении интервала усреднения увеличивается время обработки сигнала на величину, равную половине длины усреднения, что особенно важно в высокоскоростных беспроводных системах связи.

Постоянный коэффициент усиления  $K$  по причине сложной обработки сигнала не поддается аналитическому вычислению. Для его расчета использован экспериментальный метод.

При заданном интервале усреднения увеличение  $K$  приводит к увеличению вероятности пропуска сигнала (необнаружению основного пика) и уменьшению вероятности ложного срабатывания от шумовых «всплесков», уменьшение  $K$  приводит к обратному. Вероятность ложного срабатывания и вероятность пропуска сигнала являются взаимозависимыми величинами, причем увеличение одной величины приводит к уменьшению другой. В такой ситуации необходимо фиксировать одну величину. Зафиксируем величину вероятности ложного срабатывания при воздействии на вход системы только шума.

Проведенные эксперименты для модулированного 17-элементного ИСШПС дали следующие результаты: при времени усреднения, равном длительности входного сигнала,  $N = T / f_s$  отсчетов, где  $T$  - длительность всего сигнала,  $f_s$  - частота дискретизации; для достижения интенсивности ложных срабатываний  $X = 1$  необходимо применить коэффициент усиления  $K = 2,95$ . Соответственно задержка сигнала (в блоке «задержки сигнала») равна  $N_f/2$  отсчета.

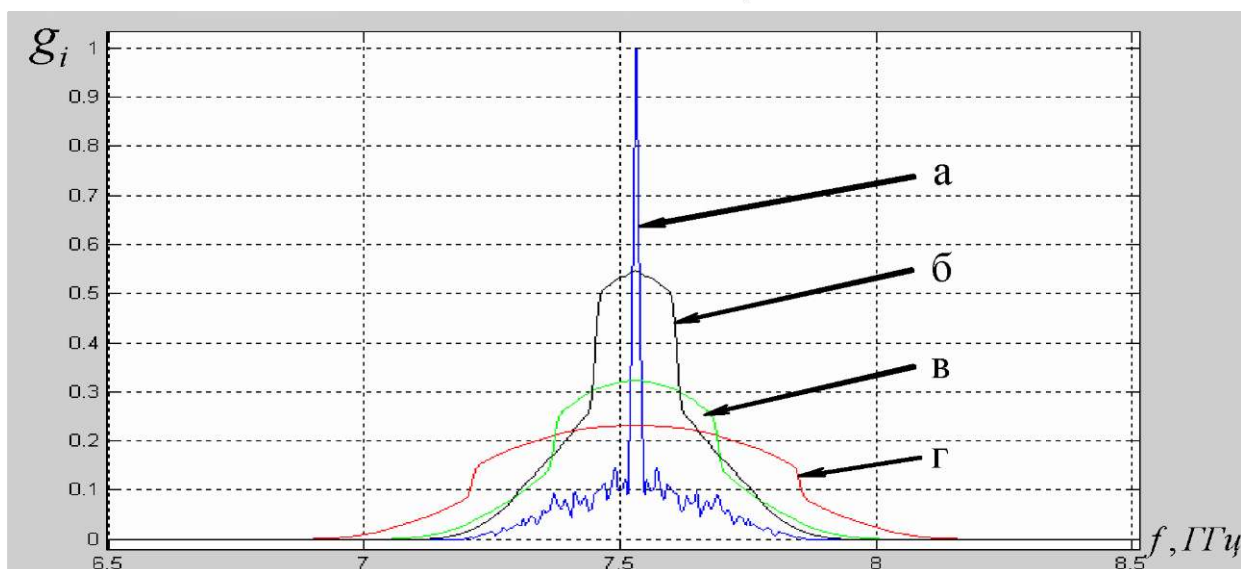


Рис. 2. Функции динамического порога при постоянном коэффициенте усиления  $K$  и различном времени усреднения  $Nf$ :

- а) сигнал на выходе блока «задержки сигнала»;
- б) время усреднения равно половине длины последовательности;
- в) время усреднения равно длине последовательности;
- г) время усреднения равно удвоенной длине последовательности

Расчет коэффициента усиления при фиксированной вероятности пропуска цели проводится аналогичным образом. Эксперимент в полном объеме при этих условиях не проводился, однако предварительные эксперименты показали, что при фиксированной длине усреднения значение коэффициента усиления  $K$  будет изменяться в зависимости от отношения сигнал-шум.

Таким образом, алгоритм работы порогового устройства можно представить в следующем виде:

$$Y = \begin{cases} 1 & \text{если } u_i \geq g_i \\ 0 & \text{иначе} \end{cases} \quad (4)$$

В случае превышения сигналом  $u_i$  порога  $g_i$  значение функции  $y$  становится равным единице. При  $y = 1$  пороговое устройство дает команду блоку «выбора максимального значения» и пропускает отсчеты сигнала  $u_i$ . Блок «выбора максимального значения» сравнивает текущий отсчет сигнала  $u_i$  с предыдущим  $u_{i-1}$  и находит локальный максимум. При усреднении сигнала локальный и глобальный максимумы проекции квадрата функции неопределенности совпадают. Как только обнаруживается макси-

Следует учитывать, что помеха будет тем эффективней, чем большая часть ее энергии будет воздействовать на полезный сигнал. Однако при использовании ИСШПС прицельную помеху не предоставляется возможным из-за огромной ширины диапазона и отсутствия несущей частоты. Для борьбы с мощными помехами предусмотрены вычисление квадрата функции взаимной неопределенности и сравнение с функцией взаимной неопределенности принимаемого сигнала, позволяющие избежать полного энергетического подавления ИСШПС беспроводной системы связи.

Рассмотрим влияние помех, попадающих в полосу обработки, но не совпадающих по времени с передачей ИСШПС. Как было сказано выше, влияние этих помех сказывается только на обнаружении сигнала. Степень влияния данных помех на обнаружение будет тем сильнее, чем больше будет схожесть помехи с сигналом. Сигналы прицельной помехи с большей скоростью передачи по сравнению со скоростью передачи ИСШПС будут давать малый отклик на проекцию квадрата функции взаимной неопределенности на временную плоскость и поэтому

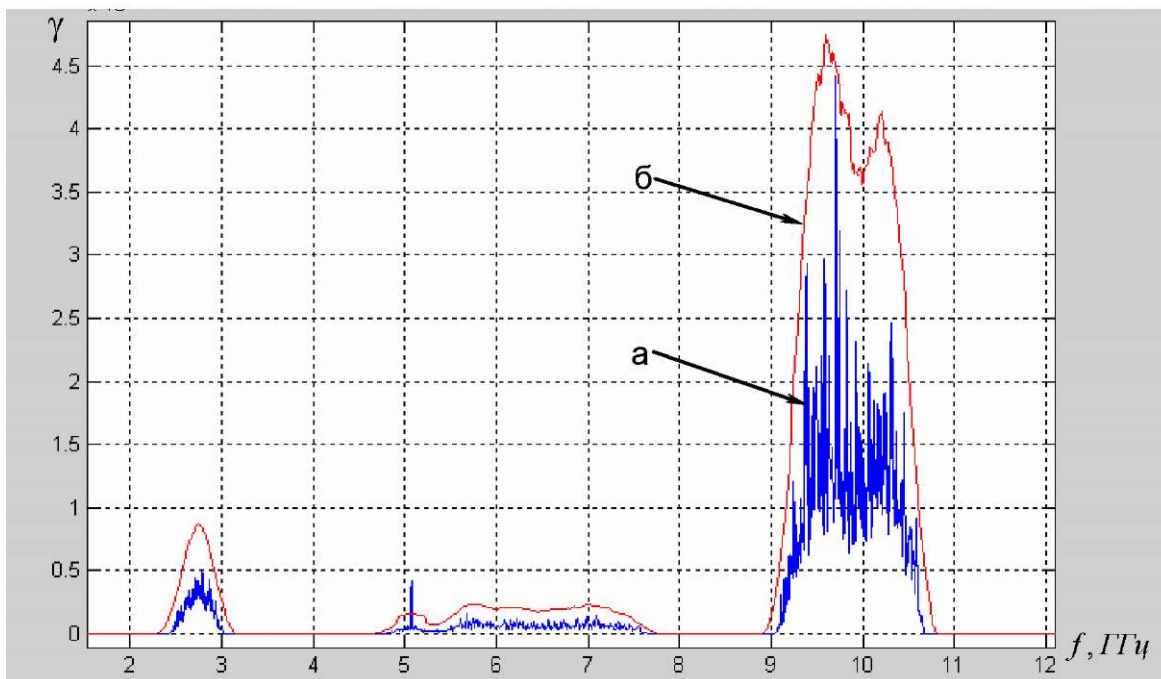


Рис. 3. Влияние неструктурированных помех на систему обнаружения ИСШПС:  
а) проекция квадрата функции неопределенности; б) функция порога

мум  $u_i$ , блок «выбора максимального значения» выдает команду на включение тактового генератора.

Рассмотрим влияние преднамеренных и непреднамеренных помех на систему обнаружения импульсного сверхширокополосного сигнала. При этом вопросы помехозащищенности демодулятора не рассматриваются, исследуется только помехозащищенность системы обнаружения.

Любая преднамеренная или непреднамеренная помеха, основной спектр частот которой находится в пределах полосы пропускания канала связи, но не попадает в полосу обработки, не может влиять на обнаружение сигнала.

будут «игнорироваться» порогом. Чем больше схожесть сигнала прицельной помехи с ИСШПС, тем больше вероятность того, что система обнаружения «сработает» по ложному сигналу. На рисунке 3 рассмотрены «действия» системы обнаружения (функция порога) ИСШПС на преднамеренные помехи на примере 13-элементного ИСШПС, модулированного последовательностью Баркера [4]. В центре находится принимаемый шумоподобный сигнал, система обнаружения реагирует на основной пик квадрата функции взаимной неопределенности. Слева помеха в виде фазоманипулированного сигнала со скоростью передачи, не совпадающей с ИСШПС, амплитуда помехи в пять

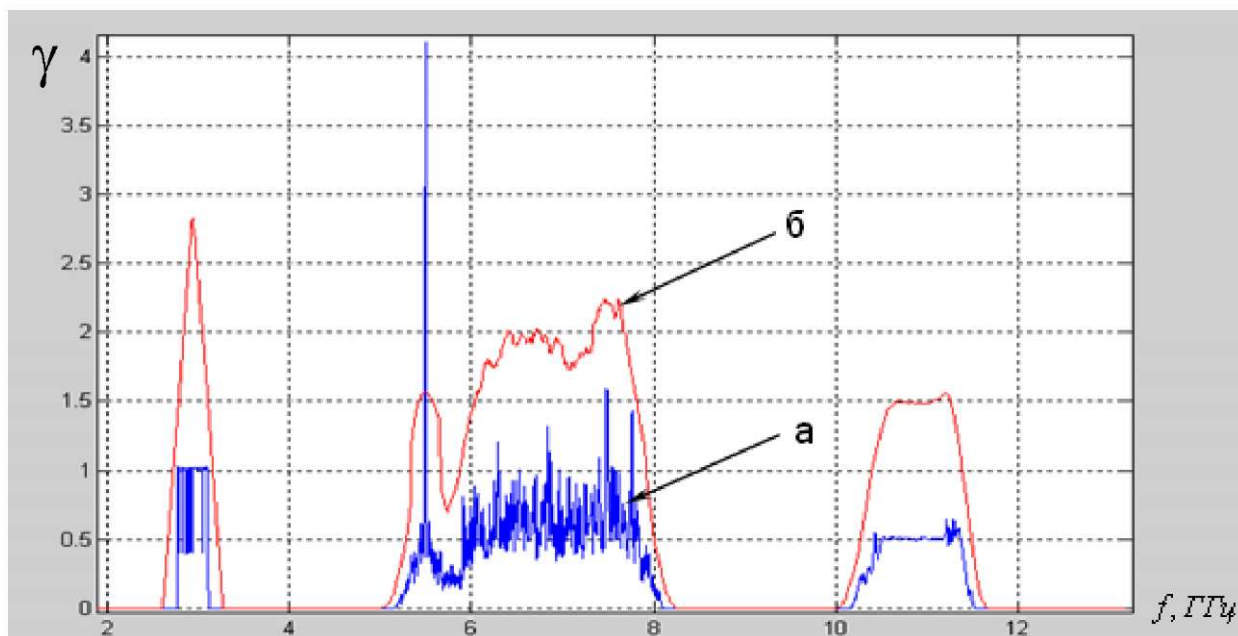


Рис. 4. Влияние импульсной помехи и помехи в виде неманипулированного гармонического колебания на систему обнаружения ИСШПС: а) проекция квадрата функции неопределенности; б) функция порога

раз превышает амплитуду сигнала. Справа помеха в виде фазоманипулированного сигнала со скоростью передачи, совпадающей со скоростью передачи ИСШПС, амплитуда помехи также в пять раз превышает амплитуду сигнала.

Как видно из рисунка 3, система обнаружения «игнорирует» помехи, но вероятность ложного срабатывания от прицельной помехи со скоростью, равной (близкой) скорости полезного сигнала, велика (рисунок 3 справа).

На рисунке 4 представлена реакция системы обнаружения (функция порога) на импульсную помеху (слева) и помеху в виде неманипулированного гармонического

колебания (справа от принимаемого сигнала). При этом импульсная помеха по амплитуде превышает полезный сигнал в несколько раз. Гармоническая помеха равна по амплитуде полезному сигналу, однако увеличение амплитуды гармонической помехи не вызовет ложного обнаружения.

Наиболее оптимальный способ подавить данную систему обнаружения - это передача помехи, представляющей собой такой же сигнал. Следовательно, для подавления системы обнаружения противнику необходимо сначала принять ИСШПС, записать и распознать его. Однако следу-

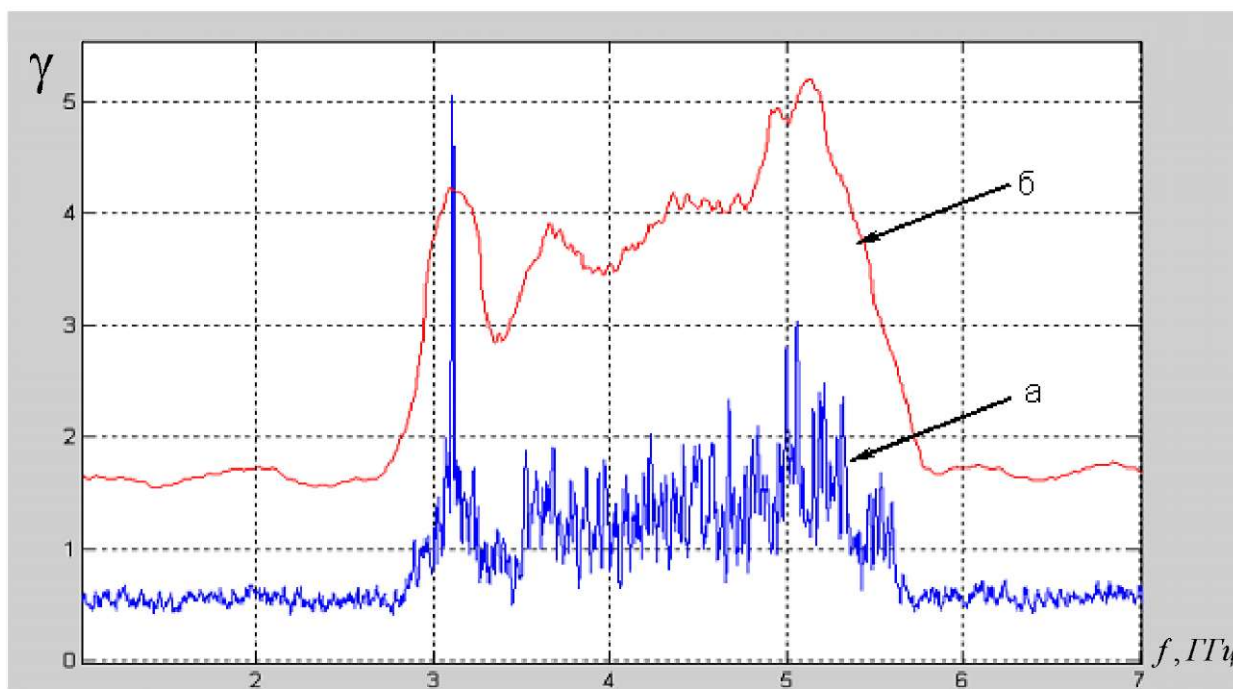


Рис. 5. Влияние немодулированной гармонической помехи, равной по мощности полезному сигналу, на систему обнаружения: а) проекция квадрата функции неопределенности; б) функция порога

ет отметить, что однократная помеха сигналом, подобным передаваемому ИСШПС (структурированная помеха), не вызовет ложного приема, т. к. производится сравнение с функцией взаимной неопределенности и вероятность совпадения модулирующих кодовых последовательностей чрезвычайно мала. Следовательно, для подавления системы обнаружения ИСШПС необходимо постоянно иметь структурированную помеху. Влияние структурированной помехи можно снизить периодической сменой кода, скорости передачи и длительности ИСШПС.

Рассмотрим влияние помехи в виде немодулированного гармонического колебания, совпадающей со временем передачи ИСШПС (рис. 5).

Гармоническая помеха образует свой отклик на согласованный фильтр. При этом происходит повышение постоянного уровня, который повышает уровень функции порога и в зависимости от отношения сигнал-шум и уровня гармонической помехи может привести к пропуску сигнала. Следует заметить, что неманипулированная гармоническая помеха не влияет на положение основного максимума.

Таким образом, использование функции адаптивного порога и функции взаимной неопределенности позволяет говорить об эффективной системе обнаружения ИСШПС при воздействии различных помех.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье рассмотрены потенциальные характеристики импульсных сверхширокополосных систем. Проанализирована возможность создания высокоскоростных сетей ИСШПС связи с должным уровнем развед- и помехозащищенности. Предложен блок обнаружителя с адаптацией порогов при изменении уровней сигнала и шума. При этом введен так называемый «динамический» порог, позволяющий системе обнаружения игнорировать помехи, уровень которых может превышать уровень сигнала. Вы-

ведены правила выбора параметров «динамического» порога. Проанализированы действия системы обнаружения при различных видах преднамеренных и непреднамеренных помех. Отмечено, что «динамический» порог зависит только от отношения сигнал-шум и не зависит от уровня сигнала.

В дальнейшем результаты работы могут быть использованы при построении систем связи и систем синхронизации ИСШПС.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Радзиевский В.Г., Трифонов П.А. Обработка сверхширокополосных сигналов и помех. - М.: Радиотехника, 2009. - 288 с.
2. Быков С.Ф., Шалимов И.А. Передача речи в современных сетях связи. - Специальная техника. - 2000. - №6. - С. 72-75.
3. Симаков В.В. Сверхширокополосная связь «СШПС-Импульс»// Состояние и перспективы решения специальных задач. - 2009. - №3. - Режим доступа: <http://kbor.ru/2009/755/233278/>.
4. Варакин Л.Е. Системы связи с шумоподобными сигналами. - М.: Радио и связь, 1985. - 384 с.
5. Балакирев С.В., Давыдов А.В., Попов А.С. Анализ двумерной функции неопределенности импульсной последовательности сверхширокополосных сигналов. - Труды 66-й конференции, посвященной дню радио, НТОРЭС / СПбГЭТУ ЛЭТИ. - СПб, 2011. - С. 234-238.
6. Журавлев В.И. Поиск и синхронизация в широкополосных системах. - М.: Радио и связь, 1986. - 240 с.
7. Цифровые радиоприемные системы: справочник / под ред. М.И. Жодзишского. - М.: Радио и Связь, 1990. - 208 с.
8. Калинин В.О., Носов В.И. Оценка параметров короткоимпульсной сверхширокополосной системы связи // Вестник СибГУТИ. - 2011. - №3. - С. 73-85.