

03, сентябрь 2018

УДК 621.391, 621.372

Анализ перспектив использования непараметрических и робастных статистик при обработке сигналов с псевдослучайной перестройкой рабочей частоты

Борукаева А. О., студент

Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,
кафедра «Защита информации», SPIN-код: 6363-3089
alexbmstu.b@yandex.ru

Бердигов П. Г., студент

Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,
кафедра «Защита информации», SPIN-код: 1680-2245
palber96@gmail.com

Научный руководитель: Филатов В. И., доцент, к.т.н.
Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,
кафедра «Защита информации», SPIN-код: 9514-7430
vf110@mail.ru

Аннотация: Рассмотрены основные методы преодоления априорной неопределенности на примере решения задачи обнаружения некогерентной последовательности радиоимпульсов в условиях помех. Для увеличения качества обнаружения некогерентной последовательности радиоимпульсов предложено использование весовой обработки. Представлены некоторые способы повышения помехоустойчивости. Представлен популярный метод, основанный на оценке параметра (математическое ожидание) сдвига плотности вероятности. Авторы анализируют некоторые способы формирования оценок математического ожидания. Уделено особое внимание анализу особенностей применения известных помехоустойчивых методов обработки радиосигналов в приемниках сигналов с псевдослучайной перестройкой рабочей частоты. Делается вывод о принятии во внимание некоторых характеристик для разработки перспективных методов обнаружения и различения некогерентных сигналов с псевдослучайной перестройкой рабочей частоты.

Ключевые слова: априорная неопределенность (prior uncertainty), сигнал (signal), помеха (interference), некогерентная последовательность радиоимпульсов (non-coherent sequence of radio pulses), псевдослучайная перестройка рабочей частоты (frequency-hopping spread spectrum), помехоустойчивость (noise immunity), плотность вероятности (density function), огибающая (envelope), математическое ожидание (expectation value), приемники сигналов (signal receiver).

Введение

Использование при разработке алгоритмического обеспечения в разрабатываемых приемниках сложных сигналов перспективных методов обработки позволяет на этапе обработки выборки отсчетов значительно ослабить влияние помех на качество приема.

Известно, что эффективность реализуемых устройств обработки сигналов зависит от степени соответствия реальной сигнально-помеховой обстановки в радиоканале и той модели сигнально-помеховой обстановки, которая использовалась при синтезе приемника. Таким образом, степень априорной неопределенности является определяющим фактором при обосновании разрабатываемых методов обработки сигналов. Современная теория оптимального приема сигналов предполагает, как правило, параметрическую априорную неопределенность, что позволяет синтезировать оптимальные структуры приемников, однако последние могут быть реализованы на практике. Так, например, полученные в рамках байесовского подхода оптимальные процедуры сигналов предполагают точное знание законов распределения сигналов и помех, и т.к. на практике такой подход может быть принят только с определенной долей условности, при реализации приемников оптимальной процедуры в чистом виде не используются.

Методы преодоления априорной неопределенности

Рассмотрим основные методы преодоления априорной неопределенности на примере решения задачи обнаружения некогерентной последовательности радиоимпульсов в условиях помех. В этом случае имеет место накопление разнесенных по времени, а в случае ППРЧ¹ и по частоте отсчетов, поэтому в условиях помех часть отсчетов может содержать только шум (сигнал с шумом), а часть помимо этого аддитивные, сосредоточенные по времени или частоте помехи. При отсутствии в радиоканале сосредоточенных помех, обычное последетекторное линейное накопление отсчетов огибающей x , (квадрата огибающей для малых отношений сигнал/шум) с последующим принятием решения по правилу (1):

$$\sum_{i=1}^n x_{<\theta=0}^{>\theta>0} C, \quad (1)$$

где θ - порог, выставляемый исходя из требований к качеству обнаружения с учетом отношения сигнал/шум в канале, реализует один из известных методов обнаружения некогерентной последовательности радиоимпульсов.

¹ ППРЧ – псевдослучайная перестройка рабочей частоты

В условиях действия сосредоточенных помех происходит резкое ухудшение качества обнаружения. Основная причина состоит в отсутствии априорных сведений о параметрах помех. Одним из возможных путей решения проблемы, является введение весовой обработки, в этом случае решающее правило в самом общем случае имеет вид (2):

$$\sum_{i=1}^n a_i(p_i) x_{i < \theta=0}^{> \theta=0} C, \quad (2)$$

где a_i - весовой коэффициент, p_i - отношение сигнал/ (шум + помеха) для i -го отсчета.

Если оценка p производится непосредственно в процессе обнаружения, то такой метод обычно именуется адаптивным, или эмпирическим байесовским. Следует подчеркнуть, что получение устойчивых оценок p_i : является ключевым местом многих адаптивных методов, т.к. использование плохих оценок может только ухудшить характеристики обнаружения в сравнении с обычными.

При отсутствии точных оценок прибегают к иным процедурам, заключающимся в модификации элементов выборки. Одна из процедур, именуемая винзоризацией [1], состоит в преобразовании части отсчетов, превысивших некоторый порог, который как правило, выбирается по оценке стандартной ошибки наблюдений. В последующем по вновь сформированной выборке, где часть отсчетов уже преобразована, производится уточнение порога с повторной винзоризацией и т.д. Другой способ модификации выборки заключается в ее усечении посредством отбрасывания части наибольших или наименьших отсчетов, что также в значительной степени снижает вероятность ошибочных решений.

Помимо модификации выборки существуют другие способы борьбы с негативным воздействием сосредоточенных помех.

Одним из распространенных способов повышения помехоустойчивости на этапе обработки выборки является прямое использование непараметрических статистик [2, 3]. Известно значительное число знаковых, ранговых и т.п. обнаружителей [1, 3, 10], реализующих этот способ. Следует заметить, что попытка строить устройства обработки для самого широкого класса сигнально-помеховых ситуаций, без какого-либо учета имеющихся априорных сведений обеспечивает стабилизацию рабочих характеристик обнаружителя, но влечет необходимость увеличения рабочей выборки, что не всегда правильно. Кроме того, прямое использование непараметрических статистик в рассматриваемой задаче некогерентного обнаружения малоперспективно, т.к. непараметрические статистики в таком варианте использования предполагают симметричность плотностей вероятностей подлежащих обнаружению параметров сигналов, а как известно, например, плотность вероятности огибающей шума имеет распределение Релея, для которого это условие не выполняется.

Одним из способов применения непараметрических статистик с учетом априорных сведений является их использование в двух выборочных процедурах обнаружения, в которых практически решается задача установления факта принадлежности рабочей выборки и, сформированной некоторым образом, эталонной выборки к одной и той же генеральной совокупности. Другим способом получения дополнительной информации может быть использование многоканальных схем обнаружителей, использующих процедуру вычисления взаимных рангов [3, 6].

Еще одним направлением повышения помехоустойчивости может быть поиск решающих статистик, сохраняющих устойчивость при вариациях сигнально- помеховой обстановки, т.е. это по сути промежуточная модель, для которой, при не очень существенном снижении помехоустойчивости по отношению к идеальной параметрической модели, обеспечивается стабильность рабочих характеристик для некоторого, достаточно широкого класса сигнально - помеховых ситуаций. Решающие статистики, обладающие подобными свойствами, в литературе именуются робастными.

Один из современных подходов в теории обнаружения предполагает на начальном этапе осуществлять выбор того или иного информационного признака в распределении энергетического параметра сигнала, по которому оценивается наличие или отсутствие сигнала. В качестве такового могут использоваться параметры, характеризующие положение (сдвиг) плотности вероятности отсчетов или их функционалов, параметры масштаба, параметры формы и т.д. Наибольшее распространение получили методы, основанные на оценке параметра сдвига (положения) плотности вероятности. В качестве параметров, характеризующих положение плотности вероятности, могут использоваться оценки математического ожидания, медианы, моды, квантилей и т.д. Наименее робастными в этом случае являются оценки математического ожидания, т.е. выборочное среднее. В современной теории робастности различают три наиболее распространенных способа формирования оценок, а также ряд оценок, которые по мнению авторов представляется весьма перспективными. К основным относят M, L и R оценки.

M - оценками называют оценки, максимизирующие некоторую функцию выборочных отсчетов, выполняющую роль обобщенной функции правдоподобия (3):

$$\theta = \operatorname{argmax}^{\lambda}(x^I, \theta), \quad (3)$$

L - оценками называются оценки, получаемые в виде взвешенных сумм порядковых статистик (4):

$$\hat{\theta} = \sum_{i=1}^n \alpha_{in} x^{(i)}, \quad (4)$$

R - оценками называют оценки, получаемые с использованием рангов наблюдений, реализуемые как правило в двухвыборочных алгоритмах. Среди второй группы оценок по перспективе использования в задачах обнаружения следует выделить W - оценки, представляющие взвешенное среднее наблюдений (5):

$$\hat{\theta} = \sum_{i=1}^n x_i \alpha_i / \sum_{i=1}^n \alpha_i, \quad (5)$$

где весовые коэффициенты зависят от наблюдений следующим образом $\alpha_i = \alpha(x_i - \hat{\theta})$. Реализованная на основе W - оценок итерационная процедура получила в литературе название метода перевзвешивания наименьших квадратов [4]. Помимо M, L, R, W известны A - оценки, являющиеся модификацией для конечной выборки дисперсии M - оценки сдвига, D - оценки (минимального расстояния) используются при поиске параметра, минимизирующего расстояние между двумя плотностями вероятности, P - оценки параметра сдвига, использование которых в некоторых задачах позволяет упростить, по сравнению с M - оценками, процедуру оценки сдвига, и S - оценки, основанные на минимизации статистик масштаба. Таким образом современная теория предлагает достаточно широкий класс оценок, от корректного обоснования и использования которых зависят характеристики проектируемых устройств обработки.

Проанализируем особенности применения известных помехоустойчивых методов обработки радиосигналов в приемниках сигналов с ППРЧ. Следует подчеркнуть, что, как правило, методы, основанные на использовании робастных статистик, применяются в комплексе с адаптивными методами. Так, например, в целом ряде схем, используемых как в системах синхронизации, так и в канале выделения информации осуществляется накопление не абсолютных значений отсчетов, а отсчетов после квантования исходного сигнала на п - уровней, что является разновидностью R - оценок.

В ряде приемников на всех этапах обработки сигнала применяется мягкое или жесткое ограничение, также относящееся к методам, основанным на робастных статистиках. Применимость W - оценок можно проиллюстрировать на примере канала выделения информации, где осуществляется весовая обработка отсчетов с выходов канальных фильтров, весовые коэффициенты выбираются по оценкам отношения сигнал/(шум + помеха), осуществляемым по результатам анализа самих отсчетов [8].

Заключение

Анализ методов борьбы с помехами, используемых в рассмотренных приемниках, показывает, что при обнаружении сигнала в каналах выделения информации обычно применяются методы, основанные на оценке параметров положения (сдвига) плотности

вероятности огибающей (квадрата огибающей для квадратичного детектора), причем при накоплении элементов разнесений, как правило, осуществляется оценка выборочного среднего (обычно с модификацией рабочей выборки) или медианы.

С учетом результатов анализа перспективных методов обработки сигналов и особенностей реализации этих методов в известных приемниках сигналов с ППРЧ была сформулирована научная задача.

На основании анализа статистических характеристик модели сигнально-помеховой обстановки, отражающей специфику функционирования радиоканала с ППРЧ в условиях РЭП² и применительно к задачам обнаружения и различения, разработать методы обработки сигналов, обеспечивающие стабильные показатели помехоустойчивости в широком классе ситуаций.

В качестве основного направления избран поиск помехоустойчивых решающих статистик, т.е. поиск такого вида функционального преобразования рабочей выборки, которые обеспечивают бы заданную помехоустойчивость на этапе принятия решения и слабо зависели от изменений сигнально-помеховой обстановки. Сразу следует подчеркнуть, что такая постановка задачи не исключает возможность адаптации, если имеется возможность с достаточной точностью оценивать необходимые параметры по результатам наблюдений.

Учитывая особую важность спутниковых радиоканалов, а также возросшие возможности по ведению РЭБ³ вероятным противником в космосе, следует ожидать массированное применение РЭС⁴ различного назначения в целях нормального функционирования СКС⁵ в чрезвычайных условиях.

Применение УАС⁶, реализация методов пространственно-временной обработки сигналов в адаптивных антенных системах [5], переход в диапазон КВЧ⁷, а также использование перспективных сигналов и кодов в сочетании с современными способами их формирования и обработки не гарантируют безусловное СКС задачи по доведению команд и сигналов, циркулирующих в системах связи и управления.

Основным ограничением по дальнейшему совершенствованию элементов СКС является состояние технологической базы. Вместе с тем широкое внедрение средств вычислительной техники в перспективных приемниках СКС для обработки сигналов в

² РЭП – радиоэлектронное подавление

³ РЭБ - радиоэлектронная борьба

⁴ РЭС – радиоэлектронные средства

⁵ СКС – сигнальное кодовое слово

⁶ УАС – унифицированный аналоговый сигнал

⁷ КВЧ – частоты коротковолновой связи

реальном времени дают возможность существенно повысить помехоустойчивость разрабатываемых средств. Разработка алгоритмического обеспечения для цифровых приемников СКС, основанного на применение методов, использующих непараметрические и робастные статистики, может обеспечить существенное снижение негативных последствий воздействия сосредоточенных помех в радиоканале, использующих сигналы с ППРЧ.

Ориентация при обосновании перспективных методов обработки сигналов с ППРЧ на непараметрическую модель сигнально-помеховой обстановки представляется нецелесообразной, т.к. использование при обработке накопления элементов разнесения сигнала при ограниченных возможностях помехопостановщика гарантирует, что часть элементов разнесения сохраняет все свойства параметрической модели даже в условиях помех [7, 9].

При разработке перспективных методов обнаружения методов обнаружения и различения некогерентных сигналов с ППРЧ внимание необходимо сосредоточить на поиске устойчивых статистических оценок параметров положения плотности вероятности амплитуды огибающей, использование которых в сочетании с известными методами адаптации может повысить помехоустойчивость проектируемых приемников.

Список литературы

- [1]. Борисов В.И., Зинчук В.М., Лимарев А.Е. и др. Системы радиосвязи с расширением спектра сигналов // Теория и техника радиосвязи. 1998. Вып. 1. С. 18-48.
- [2]. Torrieri D.J. Fundamental Limitations on Repeater Jamming of Frequency - Hopping Communications // IEEE Journal on Selected Areas in Commun. 1989. May. Vol.7. № 4. P. 569-575.
- [3]. Тузов Г.И., Козлов М.Р. Помехозащищенность систем связи, использующих сигналы с псевдослучайной перестройки рабочей частоты // Зарубежная радиоэлектроника. 1983. № 3. С. 19-32.
- [4]. Абезгауз Г.Г., Тронь А.П., Копенкин Ю.Н. и др. // Справочник по вероятностным расчётам. М.: Воениздат. 1970. 536 с.
- [5]. Куприянов А.И. Радиосигналы и радиоустройства в информационных системах. М: Вузовская книга. 2014. 376 с.
- [6]. Куприянов А.И., Сахаров А.В. Теоретические основы радиоэлектронной борьбы: Учебное пособие. М.: Вузовская книга. 2007. 356 с.

- [7]. Баулин П.З., Кобелев М.А., Куприянов А.И. К оценке помехозащищенности радиосистем с широкополосными сигналами // Научно-технический журнал. Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы. 2015. Том 2. Вып. 1. С. 42-46. Режим доступа: <http://russianspacesystems.ru/nauka/nauchno-tekhnicheskii-zhurnal/anonsy/soderzhanie-nomera-tom-2-vypusk-1-2015/> (дата обращения 03.07.2018).
- [8]. Грубрин И.В., Лыгина И.Ю. Адаптивная фильтрация помех в бортовых многоканальных системах // Труды МАИ. 2013. Вып. 69. Режим доступа: <http://trudymai.ru/published.php?ID=43335> (дата обращения 03.07.2018).
- [9]. Большов О.А., Куприянов А.И. Пороговые сигналы в каналах передачи и утечки информации, передаваемой с помощью широкополосных модемов // Труды МАИ. 2001. Вып. 4. Режим доступа: <http://trudymai.ru/published.php?ID=34676> (дата обращения 03.07.2018).
- [10]. Чикин А.В. Метод быстрого обнаружения и оценки псевдослучайных сигналов в широкополосных системах связи // Труды МАИ. 2003. Вып. 13. Режим доступа: <http://trudymai.ru/published.php?ID=34446> (дата обращения 03.07.2018).