

DOI: 10.17516/1999-494X-0385

УДК 621.396.62

Abnormal Errors of Measuring Time-Frequency Parameters of Signals in Wideband Receivers: Classification and Methods of Elimination

Alexey S. Podstrigaev*

Saint Petersburg Electrotechnical University «LETI»

Department of Radio-Electronic Means

Saint Petersburg, Russian Federation

Received 25.12.2021, received in revised form 17.02.2022, accepted 09.03.2022

Abstract. We propose the classification of abnormal errors in determining the time-frequency parameters in receivers used for the wideband RF spectrum sensing. The classification of errors made it possible to substantiate and systematize the ways to eliminate them. It is advisable to use the results in the design, debugging and operation of wideband spectrum analyzers. Based on the planned operating conditions, it becomes possible to predict the appearance of potential errors and take measures to eliminate them. Understanding the causes of errors makes it easier to configure and analyze the results of wideband spectrum analyzers.

Keywords: abnormal error, normal error, wideband analysis, wideband receiver, time-frequency parameters, frequency ambiguity, RF spectrum monitoring, cognitive radio.

Citation: Podstrigaev, A. S. Abnormal errors of measuring time-frequency parameters of signals in wideband receivers: classification and methods of elimination, J. Sib. Fed. Univ. Eng. & Technol., 2022, 15(2), 223–237. DOI: 10.17516/1999-494X-0385

Классификация и способы устранения аномальных ошибок измерения частотно-временных параметров сигналов в широкополосных приемниках

А. С. Подстригаев

*Санкт-Петербургский государственный электротехнический
университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)
Российская Федерация, Санкт-Петербург*

Аннотация. Впервые предложена классификация аномальных ошибок определения частотно-временных параметров во всех основных типах приемников, используемых для широкополосного анализа сигнальной обстановки. Классификация ошибок позволила обосновать и систематизировать способы их устранения. Результаты целесообразно использовать при проектировании, отладке и эксплуатации средств широкополосного анализа. Обеспечивается возможность исходя из планируемых условий работы спрогнозировать появление потенциальных ошибок и принять меры по их устранению. Также понимание причин возникновения ошибок упрощает настройку и анализ результатов работы средств широкополосного анализа.

Ключевые слова: аномальная ошибка, нормальная ошибка, широкополосный анализ, широкополосный приемник, частотно-временные параметры, неоднозначность определения частоты, радиомониторинг, когнитивное радио.

Цитирование: Подстригаев, А. С. Классификация и способы устранения аномальных ошибок измерения частотно-временных параметров сигналов в широкополосных приемниках // Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии, 2022, 15(2). С. 223–237. DOI: 10.17516/1999-494X-0385

Введение

Широкополосный анализ (ШПА) сигнальной обстановки является одной из основных задач комплексов радиомониторинга (радиоконтроля) [1, 2] и радиотехнической разведки [3–7], а также когнитивных радиосистем [8, 9].

При построении средств ШПА используются шесть основных схем приемников: сканирующий [3–5, 7], многоканальный [3–5, 7], матричный [3–5], приемник с мгновенным измерением частоты на основе интерференционного измерения (МИЧ-приемник) [3–5], однобитный [6, 10] и цифровой приемник с субдискретизацией (ЦПСД) [11, 12]. Принцип действия каждого приемника изложен в соответствующей литературе и ввиду большого объема материала здесь не приводится.

Ошибкам и неоднозначностям измерений частотно-временных параметров (ЧВП) импульсов в различных приемниках уделяется большое внимание [1–14], поскольку они влияют на достоверность классификации сигнала. Так, уже при 5 % пропусков или ошибочных измерений ЧВП импульсов даже современные алгоритмы неверно классифицируют более 10 % принятых сигналов [15].

Принято разделять ошибки на два вида: нормальные (малые) и аномальные (большие) [1, 4, 14, 16–18].

Нормальные ошибки обусловлены влиянием различных шумов (тепловой шум радиоприемного тракта, шумы квантования и дискретизации, фазовый шум гетеродина и др.) Соответственно, такие ошибки могут быть количественно оценены с помощью статистических характеристик, таких как математическое ожидание и среднеквадратическое отклонение.

Аномальные ошибки возникают в нестандартных ситуациях. Примерами таких ситуаций являются воздействие на приемник активных импульсных и непрерывных помех, нарушение электромагнитной совместимости (ЭМС) из-за несогласованной работы собственных источников радиоизлучения (ИРИ), массированное применение ИРИ в зоне радиодоступности средств ШПА, неверная оценка требуемой величины порога обнаружения и т. д. [14, 16–19].

Таким образом, очевидно, что для каждого типа приемника условия возникновения аномальных ошибок уникальны и во многом зависят от условий работы. Соответственно, прогнозирование, выявление и устранение этих ошибок представляют наибольшую трудность при эксплуатации средств ШПА. В условиях сложной сигнальной обстановки такие ошибки могут накладываться друг на друга, практически исключая достоверное определение частотно-временных параметров сигнала. Однако классификация ошибок такого рода до сих пор отсутствует, а значит, затруднена и разработка способов их устранения. Поэтому цель настоящей работы – систематизация аномальных ошибок по причинам возникновения и способов устранения этих ошибок.

Стоит отметить, что распространенной причиной возникновения аномальных ошибок является неоднозначность определения частоты (НОЧ) различного рода. Отдельные типы НОЧ, характерной для ЦПСД, рассмотрены в [12, 20]. Классификация НОЧ, характерной для матричного приемника, предложена в [13].

Классификация аномальных ошибок

Аномальные ошибки определения ЧВП в различных типах приемников можно классифицировать по причинам их возникновения (табл. 1). Как видно по данным табл. 1, ошибки I–\$5X типов возникают в нескольких схемах приемников, ошибки X–\$5II типов характерны только для одной из схем.

Ошибка первого типа вызвана некачественным обеспечением электромагнитной совместимости (ЭМС) – как внутренней, так и внешней.

Несоблюдение внутренней ЭМС оказывает влияние прежде всего на матричный приемник и ЦПСД. В матричном приемнике, имеющем сложную аналоговую часть, источниками помех являются гетеродины. Если матричный приемник реализован так, что один гетеродин обслуживает два частотных канала [21], при плохой развязке возможно прохождение сигнала из одного канала в другой. В ЦПСД, имеющем алгоритмически сложную широкополосную цифровую часть, помехи могут возникать при недостаточном экранировании синтезаторов опорных частот цифровых микросхем. Также в обоих приемниках при работе в соответствующем диапазоне частот возможны помехи от импульсных источников питания.

Несоблюдение внешней ЭМС может вызывать ложные обнаружения в приемниках всех типов.

Ошибка второго типа обусловлена просачиванием сигналов между каналами. Эта ошибка характерна для всех приемников, имеющих разделение на частотные (многоканальный и матричный приемники) или функциональные (МИЧ-приемник) каналы.

Таблица 1. Основные причины возникновения аномальных ошибок измерения частотно-временных параметров в приемниках

Table 1. The main reasons for the occurrence of abnormal errors in measuring of frequency-time parameters in receivers

Причина аномальной ошибки	Тип приемника					
	Узкая мгновенная полоса анализа (или множество таких полос)			Широкая мгновенная полоса анализа		
	Сканирующий	Многоканальный	Матричный	МИЧ	Однобитный	ЦПСД
1. Некачественное обеспечение внутренней и внешней ЭМС	+	+	+	+	+	+
2. Просачивание сигналов между каналами	–	+	+	+	–	–
3. Прием сигналов в паразитных полосах пропускания	+	+	+	+	–	–
4. Прием сигнала на скате АЧХ (за пределами полосы приема)	+	+	+	+	+	+
5. Прием разночастотных наложенных во времени импульсов	–	–	+	+	+	+
6. Возникновение в ДРЧ гармоник основного сигнала в нелинейных элементах приемного тракта	+	+	+	+	+	+
7. Возникновение в ДРЧ гармоник от множества сигналов, прошедших через нелинейные элементы приемного тракта	+	+	+	+	+	+
8. Прием широкополосных импульсов	+	+	+	–	–	–
9. Прием «обрывков» импульсов	+	–	+	–	–	–
10. Периодичность результатов вычисления частоты	–	–	–	–	–	+
11. Соответствие результатов вычисления частоты нескольким значениям входной частоты	–	–	–	–	–	+
12. «Провалы» АЧХ вблизи частот, кратных половине частоты дискретизации	–	–	–	–	–	+

В частотных каналах просачивание вызвано тем, что форма амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) канального фильтра отлична от прямоугольной. Соответственно, на стыках соседних каналов их АЧХ перекрываются. В многоканальном приемнике частота сигнала, попавшего в зону наложения АЧХ соседних каналов, будет определена правильно только в одном канале. Во втором канале будет измерена неверная частота [13]. Аналогичная ситуация возникает и в матричном приемнике, однако она усугубляется внесением дополнительной НОЧ при прохождении через несколько ступеней обработки [13].

Каналы МИЧ-приемника разделены прежде всего функционально, хотя также имеют разделение по частоте. Основная причина просачивания сигнала здесь связана с недостаточной развязкой между каналами. Попадание сигнала на стыки каналов имеет гораздо меньшее негативное влияние, чем в многоканальном или матричном приемниках, ввиду иного принципа определения частоты.

Ошибка третьего типа связана с наличием паразитных полос пропускания у СВЧ-устройств. Эта проблема актуальна для широкополосных трактов, содержащих один и более узкополосных каналов.

В сканирующем приемнике помеховый сигнал может быть принят в паразитной полосе приема при нахождении рабочей частоты в нижней части диапазона рабочих частот (ДРЧ) приемника.

В многоканальном, матричном и МИЧ-приемниках паразитные полосы нижних по частоте каналов могут накладываться на основные полосы верхних частотных каналов. Соответственно, для этих приемников сигнал принимается сразу несколькими каналами, причем в низкочастотных каналах возникает аномальная ошибка измерения частоты.

Ошибка четвертого типа возникает при приеме сигнала на скате АЧХ за пределами ДРЧ приемника. Как и ошибка второго типа, она связана с неидеальностью АЧХ полосно-пропускающих устройств.

Ошибка пятого типа вызвана приемом наложенных во времени импульсов, различающихся по частоте. При этом полагается, что приемный тракт для сигналов линеен (случай с нелинейным трактом будет рассмотрен далее).

Следует разделять наложение импульсных сигналов и непосредственно импульсов. При наложении даже десятков импульсных сигналов с высокой скважностью их импульсы могут практически не накладываться во времени. Соответственно, ошибки обработки в этом случае практически исключены. И наоборот, при малой скважности сигналов наложение их импульсов более вероятно. Поэтому наложение импульсных сигналов не всегда затрудняет обработку, а наложение импульсов однозначно требует мер по снижению ошибок измерений.

В приемниках с выделением одной (сканирующий приемник) или нескольких (многоканальный приемник) полос анализа такая ошибка минимальна. Это связано с тем, что существующие методы анализа (на основе быстрого преобразования Фурье, вейвлет-обработки и др.) при относительно небольших вычислительных затратах позволяют различать сигналы в узкой полосе с разрешением в несколько тысяч точек.

В матричном приемнике, несмотря на узкую мгновенную полосу анализа, возникновение ошибки связано с возможностью обработки сигналов, перенесенных из разных частотных каналов в единую полосу промежуточных частот. При этом возникает НОЧ, которая и приводит к возникновению аномальной ошибки. Количество частот, обнаруженных приемным устройством, определяется как

$$X = A^{N-M} \prod_{i=1}^M B_i,$$

где M – количество ступеней, в которых сигналы не различаются; B – количество сигналов, определяемых в i -й ступени ($i = 1 \dots M$). [13]

С увеличением количества ступеней в матричном приемнике вероятность возникновения ошибки возрастает.

При широкой мгновенной полосе анализа в зависимости от принципа действия приемника аномальная ошибка возникает по различным причинам.

Ввиду интерферометрического метода измерения частоты в МИЧ-приемнике наложение импульсов во времени приводит к ошибкам. А поскольку величина ошибки определяется соотношением фаз и амплитуд входных сигналов, то спрогнозировать величину ошибки на практике весьма затруднительно.

Однобитный приемник имеет узкий динамический диапазон (5...6 дБ) при приеме наложенных импульсов [10, 22]. Эксперимент для двух сигналов [22] показал, что в этом диапазоне усредненная вероятность ложной тревоги составляет 1,37 %. Соответственно, в этих случаях возникают аномальные ошибки измерения. Вне этого диапазона более слабый сигнал практически не обнаруживается.

В ЦПСД каждому принятому сигналу соответствует кортеж частот, образованный значениями частоты сигнала в первой зоне Найквиста всех каналов. Но при наличии на входе нескольких сигналов возможно перепутывание элементов кортежей. В результате невозможно однозначно определить, каким входным частотам соответствуют те или иные кортежи. Более того, возможно формирование кортежей, образующих частоты, которые на самом деле на входе отсутствуют [12].

Ошибка шестого типа возникает в широкополосном нелинейном тракте при попадании на вход приемника мощного сигнала, гармоника которого попадает в полосу приема. При достаточной мощности эта гармоника определяется как полезный сигнал.

Ошибка характерна прежде всего для приемников с широкой мгновенной полосой анализа (МИЧ-приемник, однобитный и ЦПСД), если выполняется условие $F_v \geq 2F_n$, где F_n и F_v – нижняя и верхняя границы ДРЧ соответственно. В этом случае вторая гармоника мощного сигнала на частоте F_n попадает в мгновенный ДРЧ приемника. Если $F_v \gg 2F_n$, при соответствующей мощности входного сигнала и широком динамическом диапазоне (ДД) приемника возможно обнаружение не только второй, но и более высоких гармоник.

Для приемников с узкой мгновенной полосой анализа, в которых на входе установлен широкополосный усилитель, работающий во всем ДРЧ приемника, ошибка возникает, даже если основной сигнал не попадает в полосу анализа. К таким приемникам относятся сканирующий, матричный, а также многоканальный, считая, что в последнем реализуются узкополосные каналы обработки.

Величина свободного от ошибки ДД определяется линейностью приемного тракта и на практике составляет 30...40 дБ [23].

Ошибка седьмого типа возникает при интермодуляционных искажениях в многосигнальном режиме. Возникающие в результате искажений паразитные составляющие определяются как полезные сигналы.

Наибольший вклад в величину ДД, свободного от интермодуляционных искажений, вносит МШУ. Оценить уровень этих составляющих можно на примере одного из современных маломощных усилителей (МШУ) НМС8412 [24]. Для него типовое значение точки пересечения третьего порядка по выходу $OIP_3 = 32$ дБм при мощности выходного сигнала $P_{out} = 0$ дБм. Следует отметить, что приведенное значение OIP_3 является достаточно высоким для широкополосных МШУ СВЧ-диапазона [25]. Согласно [26], $OIP_3 = P_{out} + 0,5IM_3$, где IM_3 – уровень интермодуляционной составляющей третьего порядка относительно несущей. Тогда уровень интермодуляционных составляющих равен 64 дБн. Однако выходная мощность данного МШУ

в точке однодецибелльной компрессии составляет $P_{1дБ} = 19$ дБм. При такой мощности уровень интермодуляционных составляющих достигает 32 дБн.

Таким образом, в зависимости от уровня входного сигнала свободный от интермодуляционных составляющих ДД изменяется приблизительно от 30 до 60 дБн.

Ошибка восьмого типа возникает в приемниках, имеющих как минимум одну узкую мгновенную полосу анализа, при приеме широкополосного импульса, спектр которого выходит за пределы полосы анализа.

Здесь следует отметить, что обработка сигналов на практике, как правило, выполняется на основе выборок, ограниченных временными окнами. Спектр сигнала, полученный по результатам обработки одного временного окна, будем называть мгновенным.

Тогда для всех приемников возникают ошибки определения ширины спектра и длительности импульса, если на протяжении длительности импульса мгновенный спектр импульса хотя бы однократно пересекает границу частотного окна анализа. И чем большая часть спектра импульса попадает при этом за границу частотного окна анализа, тем выше будут величины ошибок.

Эти ошибки возникают в сканирующем приемнике и матричном приемнике с одноканальным устройством обработки на выходе. В многоканальном приемнике без вторичной обработки ЧВП импульса, выявленного в двух каналах, обнаруживаются сразу два импульса с аналогичными ошибками.

Ошибка девятого типа возникает в сканирующем и матричном (в режиме сканирования) приемниках в случае жесткого задания программной перестройки полосы анализа. При этом возможен прием «обрывков» сигналов. Это вызывает аномальные ошибки измерения длительности импульсов, а для частотно-модулированных сигналов – ширины спектра.

Ошибка десятого типа возникает в ЦПСД и связана с периодичностью решений системы сравнений, которая решается для исключения неоднозначности при определении частоты входного сигнала [12]. Такую неоднозначность можно назвать глобальной, так как, начиная с некоторой критической частоты F_K , кортежи частот, измеряемых в каналах приемника в первой зоне Найквиста, начинают повторяться в той же последовательности, в которой они шли до указанной частоты.

Например, если $F_K = 10$ ГГц, то частотам 1; 11; 21; 31... ГГц будут соответствовать одинаковые кортежи и отличить эти частоты друг от друга будет невозможно.

Ошибка одиннадцатого типа также характерна только для ЦПСД и обусловлена способом определения частоты. При определении частоты в первой зоне Найквиста в зависимости от номера зоны Найквиста, в которую попал сигнал, его частота отсчитывается от правой (для четных зон) или левой (для нечетных зон) границы первой зоны. Другими словами, поскольку истинная зона Найквиста заранее неизвестна, то при ее переносе в первую зону теряется информация о направлении отсчета частоты. Это приводит к тому, что разным частотам, находящимся ниже F_K , будет соответствовать один и тот же кортеж частот, измеренных в первой зоне Найквиста всех каналов ЦПСД [12]. Соответственно, ввиду неоднозначности измерений может быть выбрана ложная частота. Но в отличие от аномальной ошибки восьмого типа данная ошибка возникает при измерении частот в диапазоне ниже F_K .

Ошибка двенадцатого типа возникает в ЦПСД и вызвана «провалами» АЧХ в окрестности частот $n_{Ni}F_{si}/2$, где n_{Ni} – номер зоны Найквиста в i -м канале ЦПСД.

На практике в приемнике с субдискретизацией используется квадратурное преобразование входного сигнала. Для формирования квадратурных составляющих сигнала над ним выполняют ряд преобразований [27], эквивалентных появлению полосового фильтра для каждой зоны Найквиста. При попадании сигнала на стык АЧХ двух фильтров одного из каналов приемника при недостаточной мощности сигнала он не обнаруживается. Соответственно, кортеж частот в первой зоне Найквиста становится неполным либо при приеме наложенных импульсов заполняется значениями, полученными от других сигналов. Поэтому однозначное определение частоты становится невозможным, и при неверном разрешении неоднозначности возникает аномальная ошибка.

Способы исключения аномальных ошибок

Ошибка первого типа на этапе проектирования средств ШПА устраняется тщательным экранированием излучающих узлов и чувствительных элементов тракта, воздействие на которые может привести к обнаружению помехового сигнала. При этом могут использоваться современные подходы, описанные, например, в [28].

Часто обеспечение ЭМС на этапе проектирования полностью не гарантирует исключение ошибки первого рода. Поэтому после изготовления приемника для обнаружения данной ошибки требуется лабораторная проверка. Такая проверка проводится «по закрытому каналу», т. е. с установленной на вход 50-омной нагрузкой. При этом должны отсутствовать ложно обнаруженные импульсы.

После проверки внутренней ЭМС целесообразна проверка обеспечения ЭМС с внешними источниками помех. Это могут быть как мощные ИРИ связных или радиолокационных средств, так и ИРИ, расположенные внутри комплекса ШПА, в котором используется приемник. Поэтому логично проведение проверки в условиях, приближенных к условиям эксплуатации.

При обнаружении ложных импульсов необходим поиск каналов их проникновения в приемник и тщательное экранирование.

Ошибка второго типа устраняется различными способами в зависимости от типа приемника.

В многоканальном приемнике для исключения ложных сигналов возможно сопоставление частотно-временных параметров импульсов в разных каналах. Пусть нижняя и верхняя границы первого (нижнего по частоте) канала определяются как $f_{н1}$ и $f_{в1}$, а границы второго, соседнего с первым, частотного канала – как $f_{н2} = f_{в1}$ и $f_{в2}$. Тогда, если импульсы имеют одинаковое время начала и окончания, а их частоты определяются как $f_{н1} + \Delta f_{c1}$ и $f_{в2} - \Delta f_{c1}$ либо как $f_{н2} + \Delta f_{c2}$ и $f_{в1} - \Delta f_{c2}$, возможно программное исключение ложного сигнала (где Δf_{c1} , Δf_{c2} – значения отстройки частоты сигнала относительно нижней границы первого и второго канала соответственно). В первом случае ложный сигнал находится в верхнем, а во втором – в нижнем частотном канале.

В матричном приемнике обрабатывается сигнал только из одного канала, поэтому сопоставление невозможно. Для исключения ошибки существуют следующие варианты: использование в каждом канале обнаружителя на основе фазового детектора [29]; разделение каналов на группы с отдельной обработкой сигналов в пределах каждой группы [13, 21]; дополнительное измерение частоты на стыках каналов [13, 30].

Для МИЧ-приемника снижение ошибки возможно только при значительной разнице в амплитудах наложенных импульсов.

Ошибка третьего типа устраняется подавлением паразитных полос пропускания или частотным сдвигом паразитной полосы пропускания за пределы ДРЧ приемника. Подавление реализуется с помощью методов емкостной компенсации, добавления режекторного или низкочастотного фильтра, электромагнитных запрещенных зон или четвертьволнового отрезка линии с открытым концом, рассчитанного на частоту второго резонанса [31, 32]. Частотный сдвиг выполняется с использованием резонаторов со скачком волнового сопротивления, с помощью частичного удаления экрана или комбинирования линий с положительной и отрицательной частотной дисперсией [31].

Описанные способы, однако, имеют свои недостатки. Добавление фильтра увеличивает его габаритные размеры. Емкостная компенсация и использование резонаторов со скачком волнового сопротивления значительно затрудняют стадию предварительного проектирования фильтра в САПР. Другие способы усложняют технологию изготовления фильтра. Одним из наиболее приемлемых способов является введение четвертьволнового отрезка линии с открытым концом, рассчитанного на частоту второго резонанса [33].

Ошибка четвертого типа характерна для всех приемников, однако в приемниках с цифровым (программным) ограничением ДРЧ (однобитном и ЦПСД) частоты, лежащие вне ДРЧ, могут исключаться из обработки. Тем не менее в этом случае пропускная способность цифрового приемника снижается, поскольку до исключения частоты сигналов должны быть измерены.

В остальных приемниках вероятность возникновения ошибки может быть уменьшена путем повышения избирательности на границах ДРЧ.

Ошибка пятого типа устраняется различными способами в зависимости от типа приемника.

В матричном приемнике ошибка может быть снижена за счет следующих мер: обработки импульса только из одного канала (при этом импульсы, обнаруженные в других каналах, пропускаются); дополнительного измерения частоты в каждой ступени приемника, исключающего неоднозначность [13, 30]; разделения каналов на группы и многоканальной обработки в выходном тракте [13, 21]; хранения наложенных сигналов на время обработки первого из них в фиксированной линии задержки на промежуточной частоте [34]; хранения наложенных сигналов на время обработки первого из них в широкополосном запоминающем устройстве, подключенном на вход приемника [35]. В последнем случае матричный приемник вырабатывает команды для записи спектра при обнаружении сигналов одновременно в нескольких частотных каналах.

В МИЧ-приемнике такая ошибка практически неустранима, поскольку отсутствуют способы выявления наложения импульсов [36, 4, 3].

Для однобитного приемника такие способы тоже отсутствуют [22]. Однако известен подход к снижению аномальной ошибки пятого типа на основе использования частотных каналов [37], что, тем не менее, существенно усложняет как конструкцию, так и процесс обработки сигналов.

Устранение аномальной ошибки пятого типа в ЦПСД основано на предположении о том, что приемник имеет широкий ДД, а принимаемые сигналы имеют значительный разброс

по амплитуде в пределах этого ДД. Соответственно, для определения принадлежности сигнала в первой зоне Найквиста тому или иному входному сигналу можно выполнять сравнение сигналов в первой зоне Найквиста по амплитуде. При этом должны учитываться разноканальность и неравномерность АЧХ приемного тракта [12, 20].

Ошибка шестого типа может быть снижена за счет повышения линейности тракта. Однако, если этого недостаточно, мгновенный ДД приемника может быть ограничен до диапазона, в котором сохраняется линейность тракта (приблизительно до 30 дБ относительно уровня чувствительности). Для обработки более мощных сигналов возможно использование автоматической регулировки усиления (АРУ). При этом должны обеспечиваться широкополосное измерение мощности и задержка сигнала на входе средства ШПА на время измерения мощности и переключения АРУ. Измерение мощности в широких ДД и ДРЧ может выполняться логарифмическим детектором, а задержка – широкополосной линией задержки, описанной, например, в [35, 38].

Кроме того, гармоники сигнала возникают на частотах, кратных частоте основного сигнала, а их временные параметры совпадают с параметрами сигнала на основной частоте. Это позволяет создать соответствующее правило, исключающее из обработки паразитные гармоники.

Ошибка седьмого типа также связана с нелинейностью приемного тракта, соответственно, она может быть снижена теми же путями, что и предыдущая ошибка.

Программная «очистка» сигналов от интермодуляционных составляющих может быть выполнена после определения всех параметров импульсов на основе анализа частот, временных параметров и амплитуд. Либо возможны более грубые виды «очистки» на основе только временных параметров сигналов и амплитуд или только временных параметров.

Ошибка восьмого типа, обусловленная приемом широкополосных сигналов, может быть устранена в сканирующем приемнике с помощью интеллектуальных алгоритмов слежения за центральной частотой спектра сигнала. При этом полоса анализа должна соответствующим образом перестраиваться.

В многоканальном приемнике ошибка может быть снижена путем отождествления импульсов из разных каналов на этапе вторичной обработки.

Матричный приемник для исключения ошибки восьмого типа может быть выполнен с многоканальным устройством обработки на выходе [13, 21]. Такое устройство позволит выполнить обработку аналогично многоканальному приемнику.

Ошибка девятого типа, вызванная приемом «обрывков» импульсов, может исключаться для сканирующего и матричного приемников с помощью интеллектуального алгоритма сканирования, выполняющего перестройку диапазона частотного анализа только после завершения обрабатываемого импульса в текущей полосе анализа.

Более простой подход к снижению ошибки основан на увеличении времени стояния приемника на каждом участке ДРЧ. При достаточно долгом анализе каждого участка, как правило, может быть накоплено достаточно большое количество импульсов интересующего ИРИ. Тогда доля сигналов с аномальными ошибками измерения длительности импульсов будет минимальна и на вторичную обработку практически не повлияет. Недостатками этого подхода являются длительное время сканирования ДРЧ и повышение вероятности пропуска сигналов, существующих вне текущего диапазона анализа.

Ошибка десятого типа, связанная с глобальной неоднозначностью в ЦПСД, устраняется, если наименьшее общее кратное используемых частот дискретизации больше величины, численно равной верхней границе ДРЧ F_B [12].

Тогда неоднозначность определения частоты и соответствующая ей аномальная ошибка впервые появляются на частотной оси в точке, соответствующей наименьшему общему кратному всех частот дискретизации, используемых для определения частоты.

Если для выбранной F_B описанное условие не выполняется, увеличивают количество каналов и/или изменяют частоты дискретизации.

Стоит отметить, что при выборе высоких частот дискретизации (1,5...3 ГГц) и использовании 3...4 каналов частота F_K достаточно высока и составляет десятки... сотни гигагерц [11, 12].

Ошибка одиннадцатого типа, исходя из механизма возникновения, естественным образом исключается, если ни для каких двух или более входных частот, принимаемых в ДРЧ, коротежи частот в первой зоне Найквиста не повторяются.

Расширение ДРЧ, свободного от этой ошибки, аналогично случаю с предыдущей ошибкой, достигается подбором количества каналов и частот дискретизации.

Ошибка двенадцатого типа устраняется за счет того, что по сравнению со схемами, описанными в ранних работах по ЦПСД [39, 40], используется на один канал больше. Например, если для заданного ДРЧ при выбранных частотах дискретизации для определения частоты достаточно трех каналов, то приемник должен быть четырехканальным. При этом частоты дискретизации всех каналов выбирают следующим образом.

Считаем, что для определения истинной частоты достаточно обнаружения спектральных составляющих в любых $N - 1$ каналах из N имеющихся. Также считаем, что скаты АЧХ во всех зонах Найквиста всех каналов ЦПСД идентичны и имеют крутизну, которая определяется как $S = D/\Delta f_{\text{сн}}$, где D – заданный ДД приемника, а $\Delta f_{\text{сн}}$ – ширина полосы за пределами зоны Найквиста, в которой расположен скат АЧХ фильтра.

Тогда для всех каналов должно выполняться требование, согласно которому полосы $\Delta f_{\text{сн}}$ не должны пересекаться. То есть все частоты, попадающие в интервал $n_{Ni}F_{si} / 2 \pm D/S$, не должны попадать в интервал $n_{Nj}F_{sj} / 2 \pm D/S$, где n_{Ni} , n_{Nj} – номера зон Найквиста в i -м и j -м каналах соответственно, а F_{si} , F_{sj} – частоты дискретизации в i -м и j -м каналах соответственно, причем $i = \overline{1, N}$, $j = \overline{1, N}$ и $i \neq j$.

Если рассматривать все дискретные значения частот в полосах $\Delta f_{\text{сн}}$ как множества чисел, то можно записать следующее условие устранения аномальной ошибки десятого типа:

$$\left[\frac{n_{Ni}F_{si}}{2} - \frac{D}{S}; \frac{n_{Ni}F_{si}}{2} + \frac{D}{S} \right] \cap \left[\frac{n_{Nj}F_{sj}}{2} - \frac{D}{S}; \frac{n_{Nj}F_{sj}}{2} + \frac{D}{S} \right] = \emptyset,$$

где \cap – знак пересечения множеств.

Заключение

Полученная классификация аномальных ошибок определения ЧВП в приемниках, используемых для ШПА, и способы устранения этих ошибок являются обобщением многолетнего опыта работы в этой области различных исследователей, включая автора настоящей статьи. Наибольший вклад в исследование ошибок внесли прежде всего отечественные ученые, такие

как С. А. Вакин, Л. Н. Шустов, А. И. Куприянов, Ю. М. Перунов, В. В. Мацукевич, А. А. Васильев, А. А. Сирота, Э. А. Кирсанов, В. П. Лихачев, А. М. Рембовский, А. В. Ашихмин, В. А. Козьмин и др. Среди зарубежных ученых можно выделить J. B. Y. Tsui, R. A. Poisel и P. W. East, в работах которых рассматриваются некоторые из ошибок.

Разработанная классификация аномальных ошибок дает представление о причинах их возникновения. Это особенно важно при приеме сигналов в сложной сигнальной обстановке, когда ошибки могут накладываться друг на друга и, не зная закономерностей их возникновения, выявить и устранить ошибки становится практически невозможно. Кроме того, в данной работе классификация ошибок позволила обосновать и систематизировать способы их устранения.

Полученные результаты целесообразно использовать при создании средств ШПА для комплексов радиомониторинга (радиоконтроля) и радиотехнической разведки, а также когнитивных радиосистем. На этапе проектирования средств ШПА возникает возможность исходя из планируемых условий работы спрогнозировать появление потенциальных ошибок и принять меры по их устранению. На этапах отладки и эксплуатации средств ШПА понимание причин возникновения ошибок упрощает настройку и анализ результатов работы этих средств.

Список литературы / References

[1] Рембовский А. М., Ашихмин А. В., Козьмин В. А. *Радиомониторинг – задачи, методы, средства: 2 изд.* М.: Горячая линия – Телеком, 2010. 624 с. [Rembovskij A. M., Ashihmin A. V., Koz'min V. A. *Radiomonitoring – tasks, methods, means: 2nd ed.*, Moscow, Gorjachaja linija – Telekom, 2010, 624 p. (in Russian)]

[2] Кизима С. В. Объекты и средства радиоконтроля. Совместное развитие технологий радиосвязи и радиоконтроля, *Электросвязь*, 2018, 11, 68–74 [Kizima S. V. Objects and means of radio monitoring. Joint development of radio communication and radio monitoring technologies, *Telecommunication*, 2018, 11, 68–74. (in Russian)]

[3] Перунов Ю. М., Мацукевич В. В., Васильев А. А. *Зарубежные радиоэлектронные средства. Книга 2: Системы радиоэлектронной борьбы.* М.: Радиотехника, 2010. 352 с. [Perunov Ju. M., Macukevich V. V., Vasil'ev A. A. *Foreign radio-electronic means. Book 2: Electronic warfare systems*, Moscow, Radiotehnika, 2010, 352 p. (in Russian)]

[4] Леньшин А. В. *Бортвые системы и комплексы радиоэлектронного подавления.* Воронеж: Научная книга, 2014. 590 с. [Len'shin A. V. *Onboard systems and complexes of jamming.* Voronezh, Nauchnaja kniga, 2014, 590 p. (in Russian)]

[5] Tsui J. B. Y. *Microwave receivers with electronic warfare applications.* Institution of Engineering and Technology, 2005, 460 p.

[6] Tsui J., Cheng Chi-Hao *Digital techniques for wideband receivers. 3rd ed.* SciTech Publishing Inc, New York, United States, 2015, 608 p.

[7] Poisel R. A. *Electronic warfare receivers and receiving systems.* Artech House, 2015.

[8] Axell E., Leus G., Larsson E., Poor H. *Spectrum Sensing for Cognitive Radio: State-of-the-Art and Recent Advances.* IEEE Signal Processing Magazine, 2012, 29(3), 101–116.

[9] Quan Z., Cui S., Sayed A. H., Poor H. V. *Optimal multiband joint detection for spectrum sensing in cognitive radio networks.* IEEE transactions on signal processing, 2008, 57(3), 1128–1140.

- [10] Николаев А. Н. Цифровые технологии в широкополосных приемниках СВЧ радиосигналов. *Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника»*, 2012, 35(294), 30–34 [Nikolaev A. N. Digital technologies in broadband microwave receivers. *Bulletin of the South Ural State University. Series «Computer technologies, automatic control, radio electronics»*, 2012, 35(294), 30–34 (in Russian)]
- [11] Смоляков А. В., Подстригаев А. С. Характеристики обнаружения цифрового приемника с субдискретизацией. *Радиотехника*, 2021, 9, 95–107 [Smoljakov A. V., Podstrigaev A. S. Detection performance characteristics of the digital undersampling receiver. *Radiotekhnika*, 2021, 9, 95–107 (in Russian)]
- [12] Подстригаев А. С. Методика проектирования сверхширокополосного цифрового приемника с субдискретизацией. *T-Comm: Телекоммуникации и транспорт*, 2021, 10, 11–17 [Podstrigaev A. S. UWB digital receiver design methodology with sub-Nyquist sampling. *T-Comm: Telecommunications and Transport*, 2021, 10, 11–17 (in Russian)]
- [13] Подстригаев А. С., Лихачев В. П. Неоднозначность определения частоты в матричном приемнике. *Журнал радиоэлектроники*, 2015, 2. [Podstrigaev A. S., Lihachev V. P. Ambiguity in determining the frequency in the matrix receiver. *Journal of Radio Electronics*, 2015, 2 (in Russian)]
- [14] Куприянов А. И. Аномальные ошибки при определении параметров сигналов средствами радиотехнической разведки. *Вопросы радиоэлектроники*, 2012, 2, 5–11 [Kuprijanov A. I. Abnormal errors in determining the parameters of signals by means of electronic intelligence. *Radio electronics issues*, 2012, 2, 5–11 (in Russian)]
- [15] Ge Z., Sun X., Ren W., Chen W., Xu G. Improved Algorithm of Radar Pulse Repetition Interval Deinterleaving Based on Pulse Correlation. *IEEE Access*, 2019, 7, 30126–30134.
- [16] Кирсанов Э. А., Сирота А. А. *Обработка информации в пространственно-распределенных системах радиомониторинга: статистический и нейросетевые подходы*. М.: Физико-математическая литература, 2012. 344 с. [Kirsanov Je. A., Sirota A. A. *Information processing in spatially distributed radio monitoring systems: statistical and neural network approaches*. Moscow, Fiziko-matematicheskaja literatura, 2012, 344 p. (in Russian)]
- [17] Перунов Ю. М., Куприянов А. И. *Радиоэлектронная борьба: радиотехническая разведка*. М.: Вузовская книга, 2016. 190 с. [Perunov Ju. M., Kuprijanov A. I. *Electronic warfare: electronic intelligence*. Moscow, Vuzovskaja kniga, 2016, 190 p. (in Russian)]
- [18] Сирота А. А., Кирсанов Э. А. Нейросетевые и статистические алгоритмы оценки координат источника радиоизлучения в многопозиционных радиосистемах при наличии аномальных ошибок измерения первичных параметров. *Известия ВУЗов. Радиоэлектроника*, 2006, 4, 19–27. [Sirota A. A., Kirsanov Je. A. Neural network and statistical algorithms for estimating the coordinates of a radio emission source in multi-position radio systems in the presence of anomalous errors in the measurement of primary parameters. *Proceedings of higher educational institutions. Radio electronics*, 2006, 4, 19–27 (in Russian)]
- [19] Артемов М. Л., Борисов В. И., Маковий В. А., Сличенко М. П. *Автоматизированные системы управления, радиосвязи и радиоэлектронной борьбы. Основы теории и принципы построения. Монография*. М.: Радиотехника, 2021. 556 с. [Artemov M. L., Borisov V. I., Makovy V. A., Slichenko M. P. *Automated control systems, radio communications and electronic warfare. Fundamentals of theory and principles of construction. Monograph*. Moscow, Radiotekhnika, 2021, 556 p. (in Russian)]

[20] Пат. 2761983 С2 РФ, МПК G01R23/16, H04B1/74. *Способ определения частот множества сигналов в приемнике с субдискретизацией*. Подстригаев А. С., Смоляков А. В., Шабанов М. Ф., Шпаков И. И.; заявитель и патентообладатель АО «НИИ «Вектор». – № 2021110815; заявл. 16.04.2021; опубл. 14.12.2021, Бюл. № 35 [Pat. 2761983 С2 RF, IPC G01R23/16, H04B1/74. *A method for determining the frequencies of a plurality of signals in a receiver with downsampling*. Podstrigaev A. S., Smolyakov A. V., Shabanov M. F., Shpakov I. I.; Applicant and patent holder JSC «Research Institute» Vector». – No. 2021110815; declared 16.04.2021; publ. 14.12.2021, Bul. No. 35 (in Russian)]

[21] Пат. 155553 РФ, МПК H04B15/06. *Приемное устройство*. Беззуб А. И., Подстригаев А. С.; заявитель и патентообладатель ОАО «Брянский электромеханический завод». – № 2014151261/08; заявл. 17.12.2014; опубл. 10.10.2015, Бюл. № 28. [Pat. 155553 RF, IPC H04B15/06. *Receiver*. Bezzub A. I., Podstrigaev A. S.; Applicant and patent holder JSC «Bryansk Electromechanical Plant». – No. 2014151261/08; declared 17.12.2014; publ. 10.10.2015, Bul. No. 28 (in Russian)]

[22] Tsui J. B. Y., Schamus J. J., Kaneshiro D. H. Monobit receiver. *Proceedings of the IEEE MTT-S International Microwave Symposium*. New York: IEEE, 1997, 2, 469–471.

[23] Подстригаев А. С. Влияние нелинейности элементов СВЧ тракта на возникновение неоднозначности определения частоты в широкополосном матричном приемнике. *Современные проблемы проектирования, производства и эксплуатации радиотехнических систем*. 2016, 1(10), 147–150 [Podstrigaev A. S. Influence of nonlinearity of microwave path elements on the occurrence of ambiguity in determining the frequency in a broadband matrix receiver. *Modern problems of design, production and operation of radio engineering systems*, 2016, 1(10), 147–150 (in Russian)]

[24] HMC8412 Datasheet [Electronic resource] – Access: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/hmc8412chips.pdf>.

[25] Ganesan S., Sanchez-Sinencio E., Silva-Martinez J. A Highly Linear Low-Noise Amplifier. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 2006, 12, 4079–4085.

[26] AN0–39. Stepped Frequency Measurement Improve IM Testing. Mini-Circuits. 1999 [Electronic resource] – Access: <https://www.minicircuits.com/app/AN0–39.pdf>.

[27] Lyons R. G. *Understanding digital signal processing, 3/E*. Pearson Education India, 2004.

[28] Рентюк В. Дополнительные конструктивные элементы помогают решать проблемы ЭМС. *Компоненты и технологии*. 2021, 8, 90–96 [Rentjuk V. Additional structural elements help solve EMC problems. *Components and technologies*, 2021, 8, 90–96 (in Russian)]

[29] Пат. 2185638 РФ, МПК G 01 S7/292. *Пороговый бинарный обнаружитель*. Скрипкин А. А., Олейникова Л. В.; патентообладатель Государственное конструкторское бюро аппаратно-программных систем «Связь» Всероссийского НИИ «Градиент». – № 2000117893/09; заявл. 05.07.2000; опубл. 20.07.2002 [Pat. 2185638 RF, IPC G 01 S7/292. *Threshold binary detector*. Skripkin A. A., Olejnikova L. V.; Applicant and patent holder State Design Bureau of Hardware and Software Systems «Svyaz» All-Russian Research Institute «Gradient». – No. 2000117893/09; declared 05.07.2000; publ. 20.07.2002 (in Russian)]

[30] Пат. 2587645 РФ, МПК G01R23/00. *Способ определения частоты в матричном приемнике и устройство для его осуществления*. Подстригаев А. С., Лихачев В. П.; заявитель и патентообладатель ОАО «Брянский электромеханический завод». – № 2015118979/28; заявл. 20.05.2015; опубл. 20.06.2016, Бюл. № 17 [Pat. 2587645 RF, IPC G01R23/00. *Method for determining frequency in a matrix receiver and a device for its implementation*. Podstrigaev A. S., Likhachev V. P.;

Applicant and patent holder JSC «Bryansk Electromechanical Plant». – No. 2015118979/28; declared 20.05.2015; publ. 20.06.2016, Bul. No. 17 (in Russian)]

[31] Колмакова И. В. *Микрополосковые узкополосные СВЧ-фильтры с подавлением паразитных полос*. Дис. ... канд. тех. наук. СПб, 2013. 157 с. [Kolmakova I. V. *Microstrip narrow-band microwave filters with spurious band suppression. Thesis ... cand. of tech. sci.* Saint Petersburg, 2013. 157 p. (in Russian)]

[32] Kumar C., Srinivasan V. V., Lakshmeesha V. K., Pal S. *Suppression of Second Spurious Pass Band of Hairpin Filter Using $\lambda/4$ Impedance Transformer*. International Radar Symposium India (IRSI-07), Bangalore, India, Dec. 2007.

[33] Подстригаев А. С. *Проектирование СВЧ-устройств: практикум в 2 ч. Ч. 2*. СПб: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2019. 112 с. [Podstrigaev A. S. *Design of microwave devices: a workshop in 2 parts. Part 2*. Saint Petersburg, Izdatel'stvo SPbGJeTU «LJeTI», 2019. 112 p. (in Russian)]

[34] Пат. 2422845 РФ, МПК G 01 S7/285. *Матричный приемник*. Анохин В. Д., Анохин Е. В., Кильдюшевская В. Г., Симохаммед Фаузи; патентообладатель ФГОУ ВПО «Военный авиационный инженерный университет» (г. Воронеж) МО РФ.– № 2009131254/09; заявл. 17.08.2009; опубл. 27.02.2011, Бюл. № 18 [Pat. 2422845 RF, IPC G 01 S7/285. *Matrix receiver*. Anohin V. D., Anohin E. V., Kil'djushevskaja V. G., Simohammed Fauzi; Applicant and patent holder Federal State Educational Institution of Higher Professional Education «Military Aviation Engineering University» (Voronezh) of the Ministry of Defense of the Russian Federation. – No. 2009131254/09; declared 17.08.2009; publ. 27.02.2011, Bul. No. 18 (in Russian)]

[35] Подстригаев А. С. Повышение эффективности матричного приемника в сложной сигнальной обстановке на основе оптоволоконной линии задержки. *Труды МАИ*. 2021, 116 [Podstrigaev S. S. Improving the efficiency of a matrix receiver in a complex signal environment based on a fiber optic delay line. *Proceedings of the Moscow Aviation Institute*, 2021, 116 (in Russian)]

[36] East P. W. Fifty years of instantaneous frequency measurement. *IET Radar, Sonar & Navigation*. 2012, 2, 112–122.

[37] Pat. 6448921 US. *Channelized monobit electronic warfare radio receiver*. Tsui J. B. Y., Hedge J. N., Chakravarthy V. D., Graves K. M.; Applicant and patent holder The United States of America as Represented by the Secretary of the Air Force; declared 30.07.01; publ. 10.09.02.

[38] Пат. 2716283 С2 РФ, МПК G02B6/28, H01P 9/00. *Способ регулирования задержки СВЧ-сигнала и реализующая его линия задержки*. Подстригаев А. С., Галичина А. А., Лукьянов А. С.; заявитель и патентообладатель АО «НИИ «Вектор».– № 2019122982; заявл. 19.07.2019; опубл. 11.03.2020, Бюл. № 8 [Pat. 2716283 C2 RF, IPC G02B6/28, H01P 9/00. *A method for controlling the delay of a microwave signal and a delay line that implements it*. Podstrigaev A. S., Galichina A. A., Lukyanov A. S.; Applicant and patent holder JSC «Research Institute» Vector «. – No. 2019122982; declared 19.07.2019; publ. 11.03.2020, Bul. No. 8 (in Russian)]

[39] Pat. 5099194 A US. *Digital frequency measurement receiver with bandwidth improvement through multiple sampling of real signals*. Sanderson R. B., Tsui J. B. Y. Declared 06.03.1991; publ. 24.03.1992.

[40] Pat. 5099243 US. *Digital frequency measurement receiver with bandwidth improvement through multiple sampling of complex signals*. Sanderson R. B., Tsui J. B. Y. Declared 06.03.1991; publ. 24.03.1992.