

УДК 621.391, 621.372

Разработка методов различения сложных помехоустойчивых сигналов

Филатов В.И.^{1*}, Борукаева А.О.^{1**}, Бердиков П.Г.^{1***}, Кулаков Д.В.^{2****}

¹Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана, МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2-я Бауманская ул., 5, стр. 1, Москва, 105005, Россия

²Военная академия Воздушно-космической обороны им. маршала Советского Союза Г.К. Жукова, ул. Жигарева, 50, Тверь, 170022, Россия

*e-mail: vfil10@mail.ru

**e-mail: alexbmstu.b@yandex.ru

***e-mail: palber96@gmail.com

****e-mail: kulakov-dima@mail.ru

Статья поступила 05.02.2019

Аннотация

Целью работы является выбор оптимального устройства обработки сложного сигнала, обеспечивающего низкий уровень помех. В данной статье рассмотрен принцип работы схемы формирования и обработки сложного сигнала с информационной модуляцией. Описана работа приемника, который осуществляет обратное преобразование сигнала. Авторы рассматривают несколько видов схем демодуляторов и их принцип работы [2]. На основе существующих вариантов построения схем, решающих задачу выбора канала, в котором находится сигнал, проведен сравнительный анализ вариантов построения решающего устройства, позволяющих существенно ослабить действие помех. В заключении проведен

краткий сравнительный обзор, предложенных решающих устройств. Авторы делают вывод о выборе определенного вида решающего устройства, которое увеличивает помехоустойчивость сложных сигналов, благодаря выбору определенных параметров сигнала.

Актуальность темы данной работы прежде всего обоснована необходимостью разработать новые методы и способы, позволяющие обнаружить, классифицировать и распознавать сложные сигналы того или иного радиоприемного устройства поскольку все больше радиоэлектронных средств, используемых на бортах летательных аппаратов гражданского и военного назначения, работают именно со сложными сигналами, причем наиболее распространенными сложными сигналами являются сигналы на основе линейных M-последовательностей. Использование сложных сигналов обусловлено их ярко выраженными высокими характеристиками помехоустойчивости, необходимыми в условиях функционирования радиоканалов в помеховой обстановке, при этом насыщение радиоканала сложными сигналами требует от приемника достаточно точно определить именно свои радиосигналы [3]. В связи с этим необходимо разработать подход, позволяющий определить класс и распознавать тип сигнально-кодовой конструкции для того, чтобы поэтапно упростить алгоритм обнаружения, распознавания и обработки информационных сигналов.

Ключевые слова: помехоустойчивость, модуляция, сложный сигнал, помехоустойчивое кодирование, передача информации, двоичный код, псевдослучайная последовательность.

Введение

Анализ основных направлений повышения помехоустойчивости сложных сигналов сводится к задаче обеспечения требуемой помехоустойчивости на этапе выделения информации для исследуемых радиоканалов стоит не менее остро, чем на этапе вхождения в синхронизм. В этом случае особое значение приобретает рациональный выбор параметров сигнала, обеспечивающий заданную помехоустойчивость и реализуемость устройств обработки. На основании обзора ряда отечественных и зарубежных работ в качестве основных направлений совершенствования структуры сложных сигналов с информационной модуляцией методом частотная модуляция (МЧТ) с минимальным сдвигом можно выделить следующие [4]:

1. ликвидация элементов детерминизма в видимой для вероятного помехопостановщика структуре сигнала, что достигается случайным разносом активной и дополнительной (дополнительных для $M > 2$) частотно-временных позиций, увеличением длины модулирующих ПСП (псевдослучайная последовательность), переходом к нелинейным ПСП, расширением полосы сигнала;

2. повышение эффективности помехоустойчивого кодирования, прежде всего за счет использования более мощных кодов;
3. расширение спектра каждого частотного элемента посредством дополнительной фазовой модуляции [5];
4. увеличение скорости переключения частот, переход преимущественно на быструю ППРЧ (псевдослучайная перестройка рабочей частоты) со скоростью переключения, исключающей эффективное применение ретранслированной помехи.

Принцип работы устройства обработки сложного сигнала

Рассмотрим классические схемы формирования и обработки сложного сигнала с информационной модуляцией в виде двоичной или МЧТ, представленные на рис. 1-2.

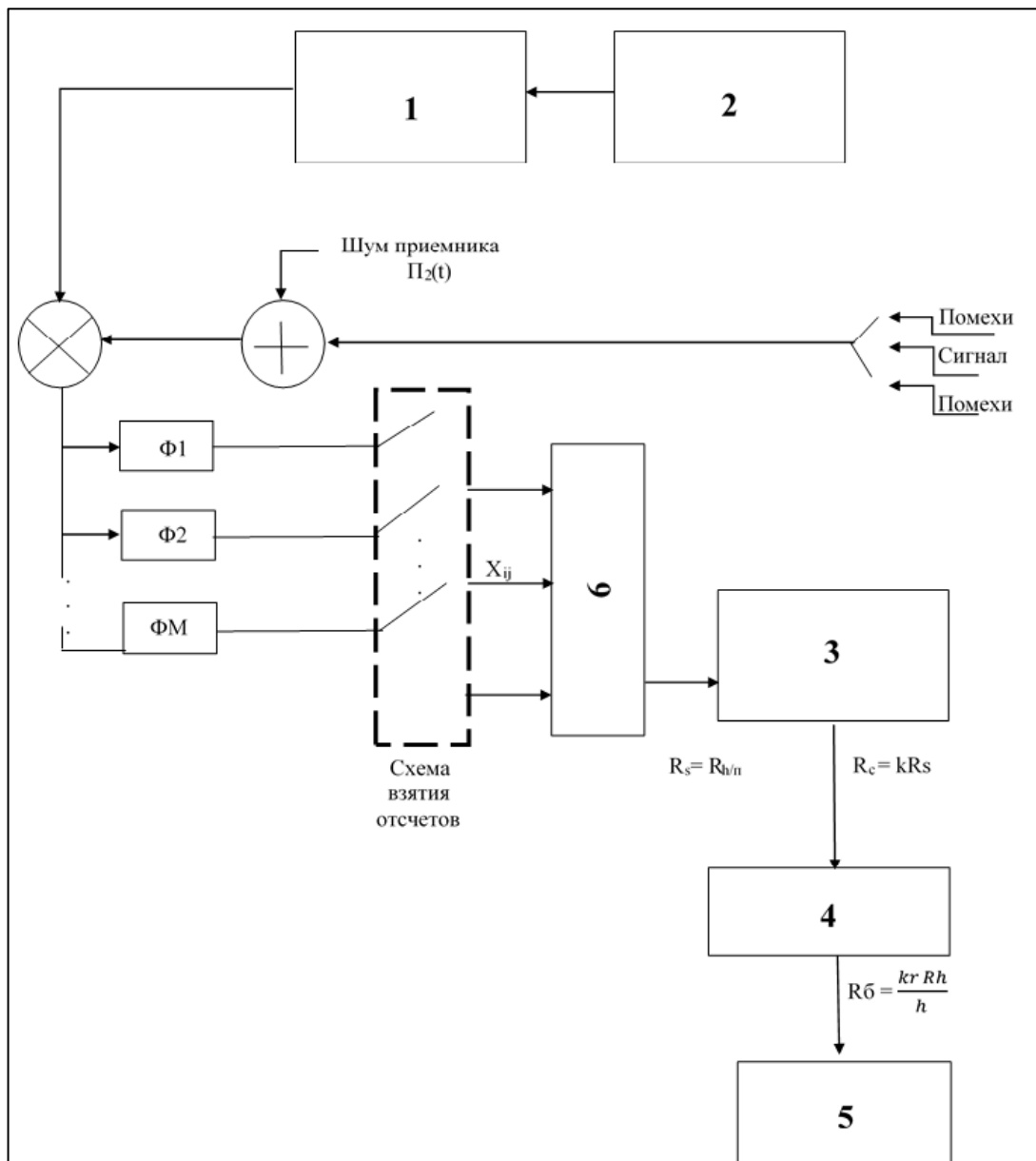


Рисунок 1. Классическая схема устройства формирования и обработки сложного сигнала с информационной модуляцией

1. СЧ - средняя частота;
2. ГПСП – генератор псевдослучайных чисел;
3. Преобразователь M – ичного кода в двоичный
4. Декодер
5. Двоичная информация

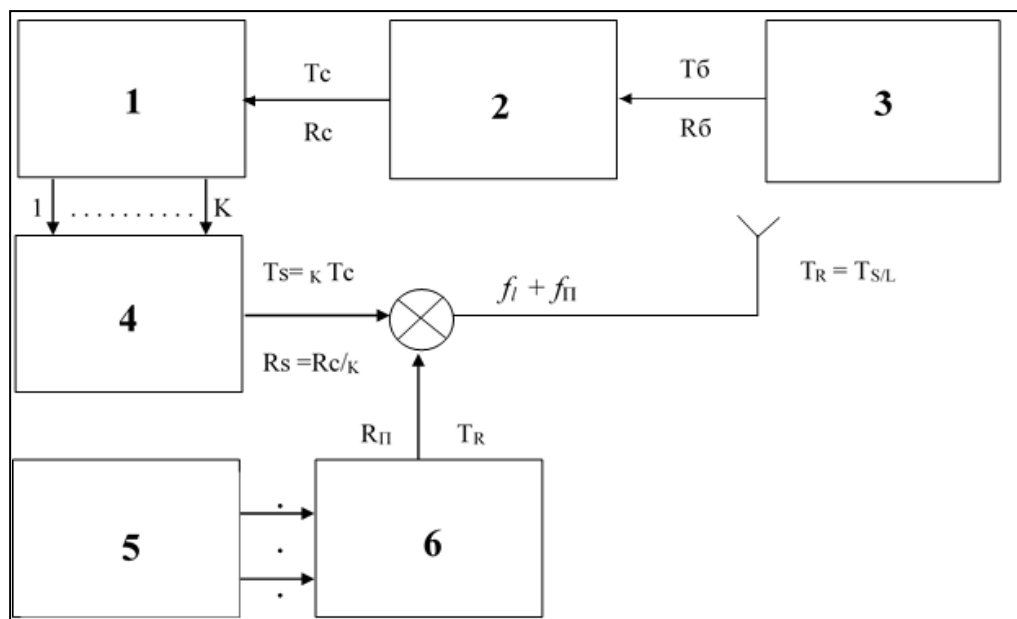


Рисунок 2. Схема устройства формирования и обработки сложного сигнала с информационной модуляцией

- 1 – преобразователь двоичного кода в М-ичный;
- 2 – кодер;
- 3 – двоичная информация;
- 4 – СЧ - средняя частота;
- 5 – ГПСЧ – генератор псевдослучайных чисел;
- 6 – СЧ - средняя частота.

Исходная двоичная информация с периодом $T_б$ и скоростью $R_б$ поступает на вход кодера, осуществляющего помехоустойчивое кодирование исходного информационного сообщения [6].

После кодера длительность элементарного сообщения равна $T_K = T_б r$, где r - отношение количества fl символов исходного сообщения к числу символов с выхода кодера. Далее двоичный код может преобразовываться в МЧТ, которым осуществляется управление синтезатором на M частот, при этом длительность одного частотного элемента равна $T_s = k T_k$ где $k = \log 2M$. Сигнал с частотой f_l ,

соответствующей одному из кодовых слов, поступает на перемножитель, где осуществляется ее перемножение с сигналом, формируемым вторым синтезатором частот, имеющим длительность одной частотной посылки T_h . Управление вторым синтезатором частот осуществляет генератор ПСП [7-9]. Посредством этой модуляции достигается дополнительное частотное разнесение каждого символа кода в n раз. Длительность частотного элемента определяется из условия (1):

$$T_h = rkT \bar{\sigma}/n \quad (1).$$

В приемнике приложении 1 осуществляется обратное преобразование сигнала. В качестве фильтров, настроенных на одну из M частот $\Phi_1 \dots \Phi_M$, обычно используются квадратурные корреляторы. Анализируя особенности схемы следует заметить, что достижение заданной помехоустойчивости при передаче информации (задается, как правило, в виде эквивалентной вероятности ошибки на бит информации $P_{б,э}$) в условиях ограничения на энергетику радиолинии и жестких требований на скорость передачи информации затруднено. [10] С одной стороны, повышая M , при фиксированной мощности кода, можно даже при ограниченных возможностях по частотному разнесению (ограничивается возможностями синтезаторов частот) обеспечить заданную скорость передачи информации и вероятность ошибки в условиях нормального шума. Однако, как это показано в [1], при наличии в канале сосредоточенных помех, с ростом M происходит существенное ухудшение качества передачи информации, обусловленное в первую очередь ростом вероятности попадания помех в полосу одного из M фильтров и чувствительностью к помехам используемой решающей статистики.

Обзор устройств, повышающих помехоустойчивость сложных сигналов

Путь, основанный на применении более мощных кодов, приводит к существенному усложнению аппаратуры, прежде всего при реализации декодеров. В связи с этим представляется целесообразным исследовать возможности повышения помехоустойчивости к сосредоточенным помехам и, прежде всего, путем замены используемой при принятии решения решающей статистики. Рассмотрим известные варианты построения схем, решающих задачу выбора канала, в котором находится сигнал, по результатам накопления отсчетов огибающей за период nT_h [11-13]. Следует подчеркнуть, что все отсчеты огибающей могут подвергаться преобразованию, чаще всего нелинейному. Такие преобразования осуществляют разного рода устройства режекции, клиппирования, умножения на некоторый весовой коэффициент, полученный на основе оценки мгновенного отношения сигнал/помеха и т.д. На рис. 3 представлена традиционная схема демодулятора, осуществляющего накопление отсчетов за период nT_h в каждом канале, после чего схема выбора максимума принимает решение в пользу того канала, накопленная сумма отсчетов огибающей в котором наибольшая.

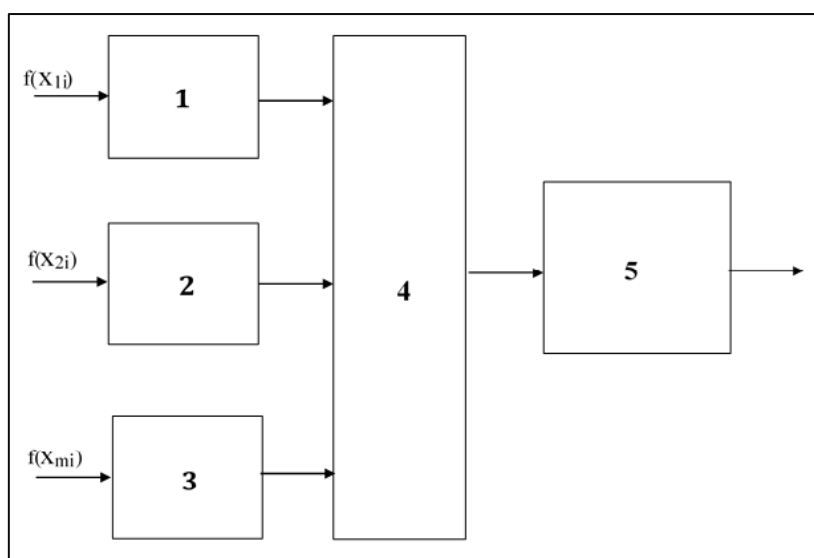


Рисунок 3. Схема демодулятора, осуществляющего накопление отсчетов за период nTh в каждом канале

1. $\sum_{i=1}^n$;
2. $\sum_{i=1}^n$;
3. $\sum_{i=1}^n$;
4. Схема выбора максимума за период $n \cdot Th$;
5. Схема преобразования m -ичного кода в двоичный.

Далее результат подается на схему преобразования M - основного кода в двоичный. Известно, что такой демодулятор обладает низкой помехоустойчивостью в условиях сосредоточенных помех, т.к. осуществляет линейное накопление отсчетов, часть которых может оказаться пораженной помехами и, если на этапе предварительного преобразования не осуществить эффективных мер по ослаблению их влияния, это может привести к росту вероятности появления ошибок [14]. Одним из вариантов построения решающего устройства, позволяющего существенно ослабить действие помех, является схема, изображенная на рис. 4.

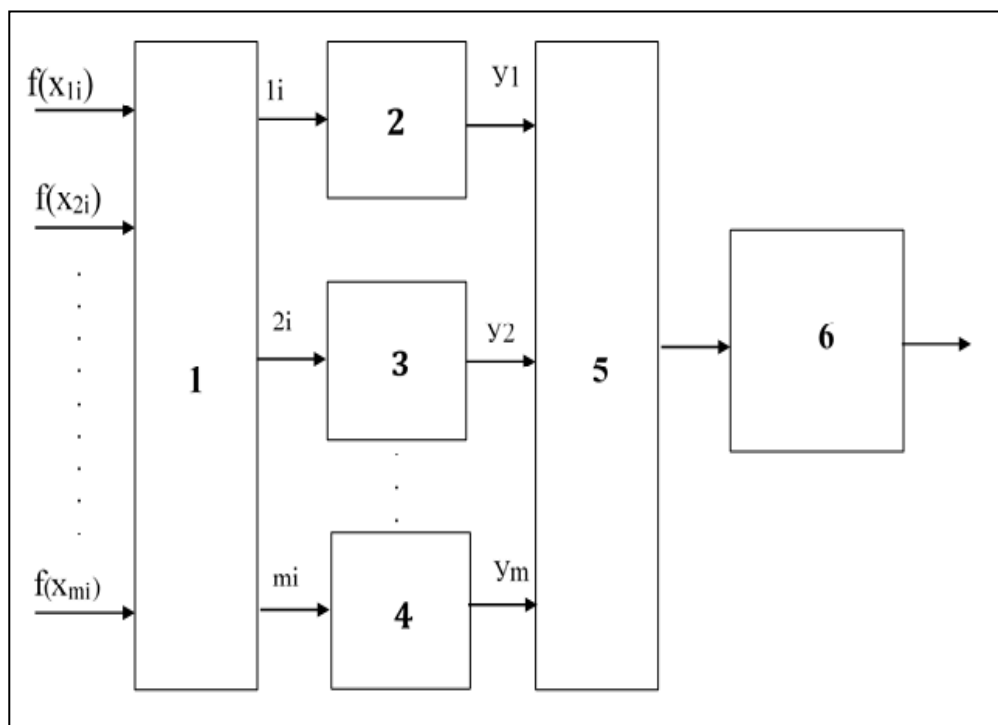


Рисунок 4. Вариант построения решающего устройства

1. Схема выбора максимума за период T_h ;

$$2. \sum_{i=1}^n;$$

$$3. \sum_{i=1}^n;$$

$$4. \sum_{i=1}^n;$$

5. Схема выбора максимума за период $n \cdot T_h$;

6. Схема преобразования м-ичного кода в двоичный.

В данной схеме реализовано посимвольное принятие решения за период T_h с последующим накоплением результатов локальных решений. После завершения накопления за период nT_h мажоритарным голосованием принимается решение в пользу того канала, где число положительных (сигнал есть) локальных решений было наибольшим [15]. Запишем решающее правило для рассматриваемого случая.

В качестве канала, где есть сигнал, принимается тот, где накоплена максимальная сумма y

$$y = \max_{i=1, M} y_i, \quad y_i = \sum_{j=1}^n \xi_{ij}, \quad \xi_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{если } x_{ij} = \max_{k=1, M} x_{ik} \\ 0, & \text{в остальных случаях} \end{cases} \quad (2)$$

В [2] произведена оценка помехоустойчивости предлагаемого варианта решающего устройства, где показано, что совместная плотность вероятности – имеет вид полиномиального распределения:

$$W(y_1, y_2, \dots, y_M) = \frac{n!}{y_1! y_2! \dots y_M!} P_1^{y_1} P_2^{y_2} \dots P_M^{y_M}, \quad (3)$$

Где $P_1 = 1 - P_0$, P_0 - вероятность локального события - сигнальный отсчет меньше шумового (предполагается, что сигнал находится в первом канале)

$$P_2 = P_3 = P_4 = \dots = P_M = P_0 / (M - 1) \quad (4)$$

Исходные данные для вычисления вероятности ошибки P_e при различных M и n представлены в таблице 1.

n	$q_0^l p_0^r$	$m = 2$	$m = 4$	$m = 8$	$m = 16$
2	p_0	1	1	1	1
3	$q_0 p_0^2$	3	2.33	2.14	2.07
	p_0	1	1	1	1
4	$q_0^2 p_0^2$	3	1	0.429	0.20
	$q_0 p_0^2$	4	3.78	3.39	3.19
	p_0^4	1	1	1	1
5	$q_0^2 p_0^3$	10	4.44	2.04	0.98
	$q_0 p_0^4$	5	5.00	4.65	4.29

	P_0^5	1	1	1	1
6	$q_0^3 P_0^3$	10	1.11	0.204	0.044
	$q_0^2 P_0^4$	15	10.6	5.55	2.80
	$q_0 P_0^5$	6	6	5.85	6
	P_0^6	1	1	1	1
7	$q_0^3 P_0^4$	35	6.48	1.33	0.30
	$q_0^2 P_0^5$	21	18.41	11.29	6.07
	$q_0 P_0^6$	7	7	6.96	7
	P_0^7	1	1	1	
8	$q_0^4 P_0^4$	35	1.30	0.102	0.010
	$q_0^3 P_0^5$	56	21.43	4.92	1.16
	$q_0^2 P_0^6$	28	27.1	19.11	9.06
	$q_0 P_0^7$	8	8	7.95	8
	P_0^8	1	1	1	1

Таблица 1. Исходные данные для вычисления вероятности ошибки P_e при различных M и n .

Например, для $P_0 = 0,1$ $M = n = 4$ равна

$$P_e = q_0^2 P_0^2 + 3,78 q_0 P_0^3 + P_0^4 = 0,012, \quad q_0 = 1 - P_0. \quad (5)$$

Третий вариант решающего устройства представлен на рис. 5. Отличием от второго варианта является то, что после посимвольного принятия решения осуществляется преобразование M -основного кода в двоичный, а затем, после накопления за период nTh , принимаются окончательное решение [16-18].

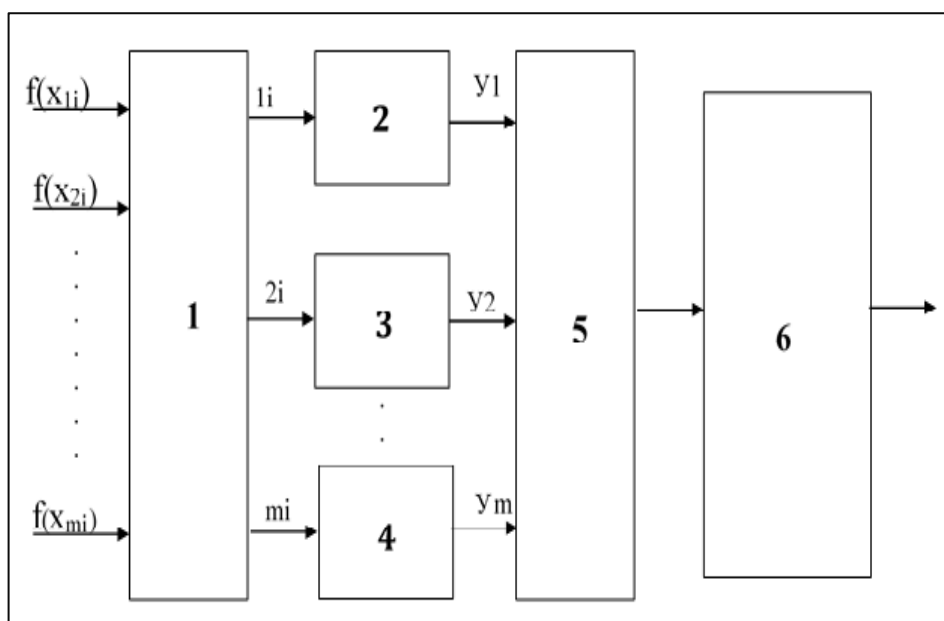


Рисунок 5. Вариант решающего устройства

1. Схема выбора максимума за период Th ;
2. $\sum_{i=1}^n$;
3. $\sum_{i=1}^n$;
4. $\sum_{i=1}^n$;
5. Схема преобразования m -ичного кода в двоичный;
6. Схема выбора максимума за период $n \cdot Th$.

Заключение

Способ оценки помехоустойчивости можно найти в [1], однако по своим характеристикам он близок к предыдущему варианту с мажоритарным голосованием. Основным недостатком второго и третьего вариантов решающего устройства является то, что при принятии локального решения фиксируется только факт - какой из каналов имеет наибольший отсчет, а информация о том, как

соотносятся между собой остальные каналы, теряется. Между тем отсчеты в канале с сигналом, как правило, больше шумовых и могут уступать только тем, которые поражены помехами [19-20]. Эти отсчеты предполагаются разнесенными по частоте. Данный недостаток может быть устранен при использовании схемы, реализующей вычисление взаимных рангов, т.е. схемы, подробный анализ которой выполнен в работе.

Библиографический список

1. Борисов В.И., Зинчук В.М., Лимарев А.Е. и др. Помехозащищенность систем радиосвязи с расширением спектра сигналов модуляцией несущей псевдослучайной последовательностью. - М: Радио и связь, 2003. - 640 с.
2. Кантор Л.Я., Ноздрин В.В. Электромагнитная совместимость систем спутниковой связи. - М: НИИР, 2009. - 280 с.
3. Солонина А.И., Улахович Д.А. Линейные дискретные системы. - СПб.: СПбГУТ, 2005. - 75 с.
4. Пестряков В.Б., Афанасьев В.П., Гурвиц В.И. и др. Шумоподобные сигналы в системах передачи информации. - М.: Советское радио, 1973. – 424 с.
5. Тузов Г.И., Козлов М.Р. Помехозащищенность систем связи, использующих сигналы с псевдослучайной перестройки рабочей частоты // Зарубежная радиоэлектроника. 1983. № 3. С. 19 - 32.

6. Баулин П.З., Кобелев М.А., Куприянов А.И. К оценке помехозащищенности радиосистем с широкополосными сигналами // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы. 2015. Т. 2. № 1. С. 42 - 46.
7. Муттер В.М. Основы помехоустойчивой телепередачи информации. – Л.: Энергоатомиздат, 1990. - 288 с.
8. Самойленко В.И. Грубрин И.В. Адаптивная фильтрация помех в многоканальных системах с пространственной и временной обработкой // Известия высших учебных заведений. Радиоэлектроника. 1988. № 4. С. 64 - 68.
9. Большов О.А., Куприянов А.И. Пороговые сигналы в каналах передачи и утечки информации, передаваемой с помощью широкополосных модемов // Труды МАИ. 2001. № 4. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=34676>
10. Чикин А.В. Метод быстрого обнаружения и оценки псевдослучайных сигналов в широкополосных системах связи // Труды МАИ. 2003. № 13. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=34446>
11. Филатов В.И. Широкополосная система радиосвязи повышенной скорости передачи информации // Труды МАИ. 2015. № 81. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=57889>
12. Кузнецов А.Б., Попов В.Д., Шавин А.С., Иванов А.А. Способ передачи информации с использованием помехоустойчивого кодирования. Патент РФ № 2553068 от 15.05.2015.
13. Баталов Л.В., Жуковский М.И., Киричек Р.В., Лазарев Б.Н. Механизмы и последствия преднамеренных электромагнитных воздействий на передачу данных //

Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики.

2012. № 2 (78). С. 103 – 108.

14. Банкет В.Л., Ляхов А.И. Применение сверточных кодов в системах связи с фазовой манипуляцией // Зарубежная радиоэлектроника. 1981. № 8. С. 3 – 23.

15. Окунев Ю.Б. Цифровая передача информации фазомодулированными сигналами. – М.: Радио и связь, 1991. – 296 с.

16. Пенин П.И. Системы передачи цифровой информации. – М.: Советское Радио, 1976. – 364 с.

17. Варакин Л.Е. Системы связи с шумоподобными сигналами. – М.: Радио и связь, 1985. - 384 с.

18. Тихонов В.И., Харисов В.Н. Статистический анализ и синтез радиотехнических устройств и систем. - М.: Радио и связь, 1991. - 608 с.

19. Сосулин Ю.Г. Теория обнаружения и оценивания стохастических сигналов. – М.: Советское радио, 1978. - 320 с.

20. Петраков О. Моделирование радиоприема в условиях шумов и помех // Радио. 2003. № 4. С. 30.