



УДК 621.396.96

В. Ф. Коротков
ООО "Специальный технологический центр" (Санкт-Петербург)
Р. С. Зырянов
Санкт-Петербургский государственный электротехнический
университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина)

Разделение импульсных последовательностей в смешанном потоке сигналов

Рассмотрена двухэтапная процедура временной селекции импульсных последовательностей. На первом этапе определяется массив наиболее вероятных значений периодов повторения импульсов. Затем для каждого элемента массива находится и выделяется предполагаемая импульсная последовательность. Для выбора вероятных значений периода повторения импульсов использован порог в виде константы.

Селекция, период повторения импульсов, радиотехнический контроль, радиоэлектронная обстановка, гистограмма разности

В [1] показана возможность классификации источников радиоизлучения (ИРИ). Для предотвращения ложной классификации сигналов в смеси, поступающей на вход радиоприемного устройства, требуется провести временную селекцию. Под селекцией будем понимать разделение смеси входных сигналов на импульсные последовательности, принадлежащие разным ИРИ. Задача временной селекции на станции радиотехнического контроля (РТК) возникает всякий раз, когда на входе анализирующего устройства одновременно присутствуют сигналы от нескольких ИРИ, образуя сложную смесь импульсов.

Решение указанной задачи осуществляется, как правило, с использованием алгоритма поиска [2]. Однако этот алгоритм работает ненадежно, если в смеси импульсов от нескольких (как правило, 3–5) ИРИ из-за случайного характера приема и измерения времени прихода импульсов (ВПИ) присутствуют ложные импульсы. В этом случае велика вероятность формирования в результате поиска ложных оценок входных последовательностей. Таким образом, в условиях высокой плотности потока сигналов и, как следствие, появления ложных импульсов указанный алгоритм не обеспечивает высокой достоверности селекции.

Целью настоящей статьи является разработка усовершенствованного алгоритма временной селекции, отличающегося большей достоверностью разделения сигналов в сложной радиоэлектронной обстановке (РЭО).

Виды сигналов. Модуляция периода повторения импульсов (ППИ) в сигналах современных РЛС является наиболее информативным параметром, позволяющим идентифицировать принадлежность сигнала отдельным ИРИ [3]. Применяются сигналы с модуляцией периода по различным законам, в зависимости от которых сигнал относится к тому или иному классу. Сигналы с постоянным периодом следования импульсов имеют отклонение (вобуляция) ППИ, не превышающую 1 % от среднего значения. Такое изменение ППИ рассматривается как случайное, не выполняющее полезной функции. Для РЛС с постоянным ППИ используется, как правило, несколько значений периода. Конкретное значение выбирается в зависимости от требуемого разрешения по дальности.

Сигнал с изменением ППИ от пачки к пачке (dwell and switch) включает в себя две и более пачек импульсов с постоянным ППИ внутри каждой пачки и его значимым изменением при переходе от пачки к пачке. Количество импульсов в пачке может меняться в зависимости от режима работы РЛС.

Сигнал с изменением ППИ от импульса к импульсу по детерминированному закону (stagger) использует 2 и более значений, выбираемых из фиксированной последовательности, с периодическим повторением. Отдельные значения ППИ могут появляться более, чем один раз за период. Период wobulation stagger-сигнала равен периоду повторения циклов повторения – кадров в последовательности. В свою очередь среди stagger-сигналов выделяются последовательности с монотонным увеличением (уменьшением) ППИ в пределах периода (sliding, W1), с изменением ППИ по синусоидальному закону относительно среднего значения (wobulation, W2) и с флуктуацией ППИ по случайному закону с размахом до 30 % от среднего значения ППИ (jittered, W3). Случайное изменение интервалов может быть распределено по закону Гаусса, равномерному, неравномерному или дискретному законам.

С точки зрения выделения импульсных последовательностей из смеси общим свойством всех stagger-сигналов, кроме jittered, является необходимость анализа изменения ППИ в пределах не менее одного периода.

Модель сигнальной обстановки. Положим, что на вход анализирующего устройства с разных направлений поступает смесь сигналов (потоков импульсов) от K источников излучения (рис. 1). В смеси могут присутствовать одновременно сигналы со всеми описанными ранее видами wobulation ППИ. Обозначим через T_k ($k = \overline{1, K}$) ППИ в k -м потоке, а время прихода n -го импульса в смеси t_i , $i = \overline{1, N}$.

ВПИ в смеси составляют последовательность $\{t_i\} \triangleq \{t_1, t_2, \dots, t_N\}$. Количество принятых импульсов смеси пропорционально времени наблюдения данного потока T_{\max} . Число межимпульсных интервалов k -го потока равно $\lfloor T_{\max}/T_k \rfloor$, где $\lfloor \cdot \rfloor$ – символ взятия целого числа, не превосходящего аргумента.

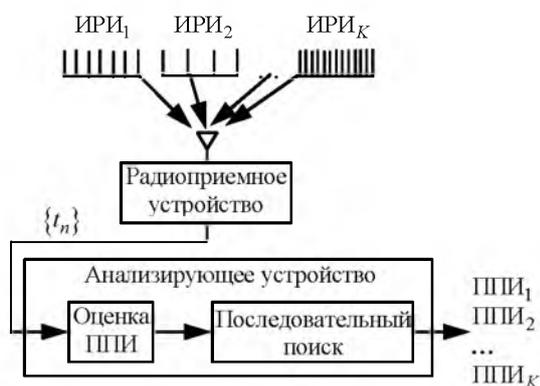


Рис. 1

Описание алгоритма. Предложенный алгоритм основан на анализе значений экстремумов гистограммы разностей ВПИ и их распределения в области определения этих разностей.

Наличие в смеси сигналов от различных ИРИ, обладающих различными средними значениями и законами wobulation ППИ, приводит к тому, что импульсы различных сигналов в смеси перемешаны, т. е. соседние импульсы с высокой вероятностью принадлежат сигналам, поступившим от различных ИРИ. В связи с этим для определения ППИ необходим анализ разности ВПИ смеси, разделенных несколькими другими импульсами. Введем понятие уровня разности ВПИ $q = \overline{1, Q}$, под которым будем понимать количество импульсов в интервале между теми из них, для которых определяется разность ВПИ.

Анализ входной смеси производится последовательно по классам сигналов. На первом проходе входная смесь анализируется на наличие последовательностей с постоянным значением ППИ, на втором определяется наличие switch-последовательностей, далее выявляются последовательности с изменением ППИ от импульса к импульсу (stagger-последовательности) различных типов. На заключительном этапе рассматривается наличие jitter-последовательности со случайным изменением ППИ.

Алгоритм подробно описан на примере последовательностей с постоянным значением ППИ. Сигналы остальных типов выделяются по аналогичным алгоритмам, но с некоторыми допущениями, которые описаны далее.

Для каждой отдельно взятой последовательности выполняются один за другим 2 этапа обработки. На первом определяется наиболее вероятное значение ППИ; на втором ищутся, выделяются и удаляются из принятой смеси импульсы, составляющие импульсную последовательность с определенным периодом либо законом его изменения.

Последовательности с постоянными ППИ выявляются простейшим обнаружителем периодических последовательностей (рис. 2) на основе метода гистограммы разностей [4]. Количество разностей, необходимых для полного анализа выборки из N импульсов на предмет наличия последовательности с постоянным ППИ, составляет $N(N-1)/2$.

На каждом i -м проходе алгоритма сначала формируются массивы разностей моментов фиксации импульсов (рис. 2, 1) уровня $q = \overline{1, Q}$:

$$\{\Delta_{qn}\} \triangleq \{\Delta_{qn} = t_{q+n} - t_n\},$$

где Δt_{qn} , ($n = \overline{1, N-q}$, $q = \overline{1, Q}$, $Q < N$) – разность q -го уровня времени прихода импульсов.

Из полученных разностей формируется гистограмма (рис. 2, 3). Для дальнейшего анализа формируется список ППИ_{*i*} (рис. 2, 4), содержащий значения, для которых уровни гистограммы превосходят порог, обычно устанавливаемый равным 1 % от числа элементов списка. Если в списке оказывается единственная разность, она принимается в качестве оценки периода следования импульсной последовательности на этапе поиска. Если заданный порог превышают несколько разностей, причем максимальное значение гистограммы имеет наименьшая из них, она принимается в качестве указанной оценки. При обоих указанных решениях анализ гистограммы q -го уровня завершается. Если же максимальное значение гистограммы соответствует не минимальному значению разности, все разности, включенные в список ППИ_{*i*}, со значениями, меньшими позиции максимального значения гистограммы, подвергаются дополнительному тесту на наличие субгармоник. При этом из списка удаляются все ППИ, кратные ППИ с максимальным значением гистограммы. Все оставшиеся в списке ППИ_{*i*} разности принимаются в качестве ППИ предполагаемых сигналов для последующего этапа поиска.



Рис. 2

На втором этапе (рис. 2, 5) выполняется поиск импульсов последовательностей с определенными ППИ. Во время поиска допускается отклонение ППИ от определенного ранее значения¹ в пределах 1 мкс.

Для минимизации неудачных выборов поиск следует начинать с малых значений интервалов.

Обычно исходной точкой поиска последовательности является любая произвольно выбранная пара импульсов. В этом случае, если выборка содержит несколько сигналов, существуют ложные интервалы, не принадлежащие ни одной последовательности, что увеличивает время поиска.

Число итераций можно существенно уменьшить, если поиск начинать с анализа последовательности из трех импульсов. Это позволяет исключить случайные пары импульсов вобулирующих последовательностей.

Блок-схема поиска последовательностей импульсов представлена на рис. 3. Здесь a, b, c – 3 анализируемых импульса, образующие 2 интервала, проверяемые (рис. 3, 5–10) на удовлетворение критерию

$$t_c - t_b = t_b - t_a = \text{ППИ}_i \quad (1)$$

(t_a, t_b, t_c – ВПИ a, b, c соответственно); d – импульс, следующий за тройкой a, b, c ; t – временное положение текущего импульса прогнозируемой последовательности; i, j – вспомогательные переменные).

После считывания выборки (рис. 3, 1) последовательно отбирается тройка импульсов (рис. 3, 4, 5, 8) и определяется их удовлетворение критерию (1) (рис. 3, 6, 9). Импульсы, соответствующие критерию поиска, удаляются из последовательности (рис. 3, 18). Каждый раз, когда находится новый импульс, соответствующий критерию поиска, время t устанавливается равным ВПИ найденного импульса (рис. 3, 10, 17).

Если тройки импульсов, удовлетворяющей критерию (1), нет, то принимается решение, что в анализируемом сигнале нет последовательности с ППИ_{*i*} (рис. 3, 7). Если же такая последовательность выявлена, продолжается поиск остальных принадлежащих ей импульсов (рис. 3, 12, 13, 15–17, 20, 21).

Для определения простой последовательности с помощью рассмотренного алгоритма требуется как минимум 5 импульсов. Для идентификации составного (stagger) сигнала требуется выделить

¹ Указанное значение допустимого отклонения характерно для выделения всех последовательностей, кроме последовательностей с вобулирующей ППИ. В последнем случае допустимое отклонение определяется среднеквадратическим отклонением ППИ.

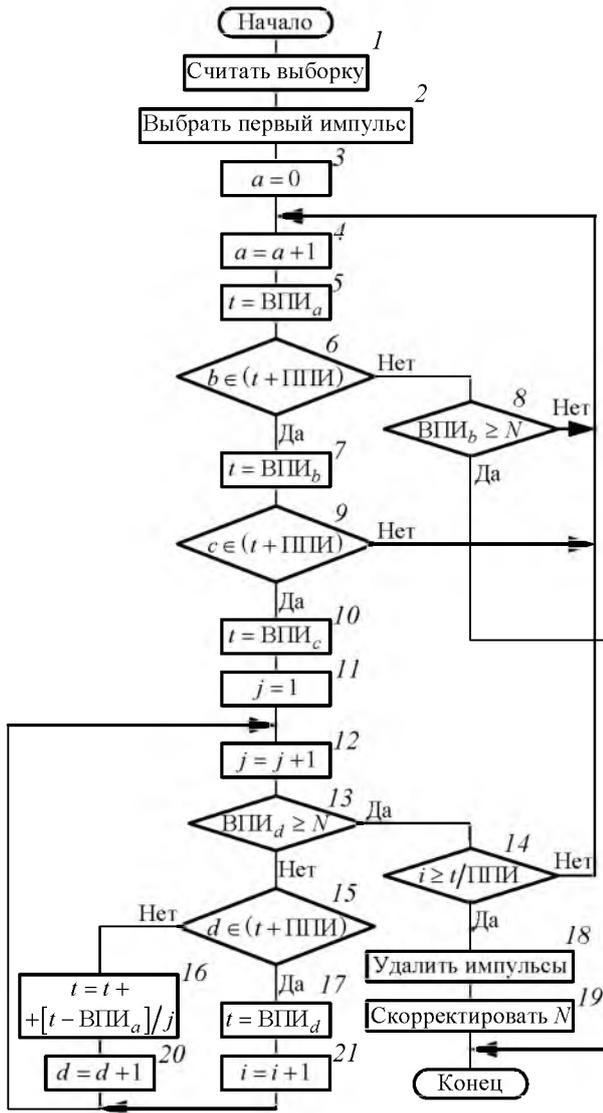


Рис. 3

M непересекающихся во времени последовательностей с одинаковыми значениями ППИ, составляющих кадр (период вобуляции) сигнала.

Сигнал, включающий в себя M пачек импульсов (dwell&switch), идентифицируется алгоритмом, если будет выделено M последовательностей с разными ППИ.

После того как отселектированы простые и вобулирующие по детерминированному закону сигналы и в исходной выборке осталась неклассифицированная последовательность импульсов, принимается решение о ее принадлежности к одному из трех видов изменения (вобуляции) ППИ: W1, W2 или W3.

Обозначим оставшуюся после временной селекции выборку $t = \{t_n\}$, $n = 1, \dots, N_0, \dots, N$, где N_0 – длина выборки, при которой наблюдается не менее одного периода вобуляции ППИ. Классификация последовательности t производится с помощью признаков C_1 и C_2 :

$$C_1 = \frac{N_c}{N-1}; \quad C_2 = \frac{1}{N_0} \sum_{n=1}^{N_0} s(n),$$

где N_c – число интервалов z_n , которые удовлетворяют условию $z_n \leq 0.03\hat{T}$;

$$s(n) = \begin{cases} -1, & z_n < -\varepsilon; \\ 0, & |z_n| < \varepsilon; \\ 1, & z_n > \varepsilon, \end{cases}$$

причем

$$z_n = x_{n+1} - x_n = t_{n+2} - 2t_{n+1} + t_n \quad (x_n = t_{n+1} - t_n),$$

$$n = \overline{1, N-2}; \quad \hat{T} = (t_N - t_1)/N; \quad \varepsilon = 3 \dots 5 \text{ мкс} - \text{значение непреднамеренного изменения ППИ.}$$

На основании анализа периодов вобуляции существующих ИРИ принято $N_0 = 64$.

Признак C_2 позволяет разделить сигнал вида W1 от сигналов W2 и W3, а признак C_1 – W3 от W2. Классификация производится в 2 этапа. Вначале с использованием признака C_2 проверяется наличие в выборке сигнала с вобуляцией W1 согласно условию $C_2 > \varepsilon_2$. Если условие не выполняется, осуществляется переход на второй шаг и по признаку C_1 принимается решение о присутствии сигнала с вобуляцией W2 (если $C_1 < \varepsilon_1$) или W3 – в противном случае.

Результаты моделирования. На рис. 4 представлена смесь трех сигналов: с постоянным значением ППИ, равным 1.7 мс (маркеры "+"), dwell&switch с двумя ППИ, равными 0.8 и 2.7 мс (маркеры "x"), и составной (stagger) сигнал с ППИ, равными 0.857, 0.920, 0.964, 1.144 и 1.34 мс (маркеры "*"). Из рисунка видно, что составной (stagger) сигнал в интервале существования $0.24 < t_n < 0.56$ с полностью смешался с другими сигналами. Тем самым не только потеряна информация об этом сигнале, но стало невозможным определение и двух остальных сигналов.

На рис. 5 приведены результаты компьютерного моделирования усовершенствованного алгоритма селекции описанной смеси сигналов. Смесь разделена на 3 импульсные последовательности с незначительным количеством ошибочных решений, в частности, полностью восстановлена структура составного сигнала.

Таким образом, рассмотренный алгоритм селекции позволяет реализовать разделение смешанного

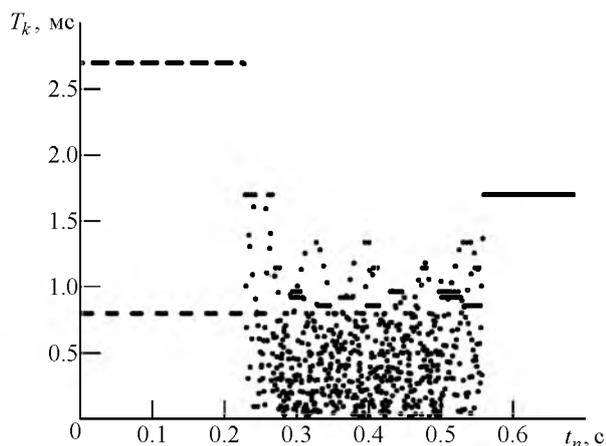


Рис. 4

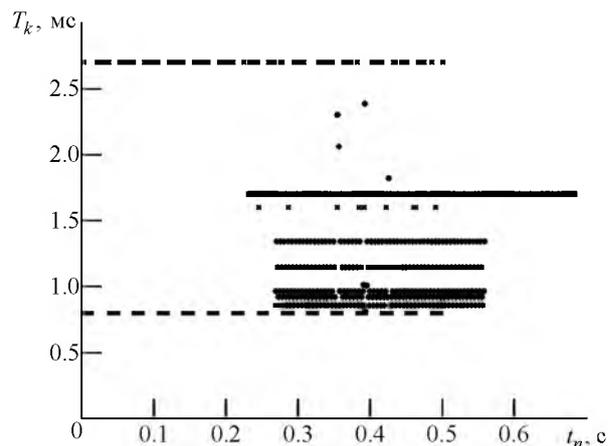


Рис. 5

потока в реальном масштабе времени за счет определения по гистограмме разностей наиболее веро-

ятных ППИ, присутствующих в исходной выборке.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Mardia H. K. New Techniques for The Deinterleaving of Repetitive Sequences // IEE Proc. F-Radar and Signal Processing. 1989. Vol. 136, № 4. P. 149–154.

2. Wiley R. G. Electronic Intelligence: The Analysis of Radar Signals. Dedham: Artech House, Inc., 1982. Vol. 1. 250 p.

3. Коротков В. Ф. Распознавание РЭС с использованием нейронных сетей. СПб.: ВУС, 2003. 156 с.

4. Milojevic D. J., Popovic B. M. Improved Algorithm for The Deinterleaving of Radar Pulses // IEE Proc. F-Radar and Signal Processing. 1992. Vol. 139, № 1. P. 98–104.

Статья поступила в редакцию 28 ноября 2016 г.

Для цитирования: Коротков В. Ф., Зырянов Р. С. Разделение импульсных последовательностей в смешанном потоке сигналов // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2017. № 3. С. 5–10.

Коротков Владимир Федорович – доктор технических наук (2005), старший научный сотрудник (1998), ведущий инженер ООО "Специальный технологический центр" (Санкт-Петербург). Автор 57 научных работ. Сфера научных интересов – пассивная радиолокация; анализ и обработка радиолокационных сигналов. E-mail: diofant2912@mail.ru

Зырянов Роман Сергеевич – бакалавр по направлению "Нанотехнологии и микросистемная техника" (2015), студент 2-го курса магистратуры Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор шести научных публикаций. Сфера научных интересов – обработка больших объемов данных, интеллектуальный анализ данных; фрактальный анализ изображений. E-mail: roman.tm.z@gmail.com

V. F. Korotkov
Special Technology Center Ltd. (Saint Petersburg)
R. S. Zyryanov
Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI"

Pulse Sequence Division in Mixed Signal Flow

Abstract. The task of time selection of the signals from individual radio emission sources (RES) occurs at the station of radio control (RC) whenever at the entrance of the analyzing device combines signals from multiple sources.

This problem is solved using a search algorithm [2]. However, this algorithm does not work reliably, if the pulses from the several (usually 3–5) RES present in the mixture. In this case, the probability of forming false estimates of the input sequences.

The purpose of this article is to develop an improved algorithm for time selection with a higher accuracy of signal separation in the complex electronic environment.

Classification of signals by referring to the wobble of pulses repetition period in the sequence, including the sequence with constant value of the period, dwell and switch, stagger, sliding, wobulaten and jittered sequences are given. Based on the classification improved algorithm for the allocation sequence is developed. The algorithm (Fig. 3) provides analysis of the histogram of the values of the delays between the adjacent pulses of the input mixture. The most probable values of the periods of repetition is allocated on the basis of the analysis of changes in pulses which are related to the signals, com-

posed the mixture. The allocation is from the simple to the more complex signals. After the detection of the individual signal in's pulses are removed from the mixture, and the analysis is repeated.

The results of the processing of signal (Fig. 6), including pulse sequences from several sources (Fig. 5) are given.

Key words: Selection, Pulse Repetition Period, Radio Control, Radio-Electronic Situation, The Histogram Of Differences

REFERENCES

1. Mardia, H. K. New techniques for the deinterleaving of repetitive sequences. IEE Proceedings F-Radar and Signal Processing. 1989, vol. 136, no. 4, pp. 149–154.
2. Wiley R. G. Electronic intelligence: the analysis of radar signals. Dedham, MA, Artech House, Inc. 1982, vol. 1, 250 p.
3. Korotkov V. F., Raspoznavaniye RES s ispolzovaniem neyronnih setey [Radar recognition with neural networks]. Saint Petersburg, VUS Publ., 2003. 156 p. (In Russian)
4. Milojevic, D. J., and B. M. Popovic. Improved Algorithm for the Deinterleaving of Radar Pulses. IEE Proceedings F-Radar and Signal Processing. 1992, vol. 139, no. 1, pp. 98–104.

Received November, 28, 2017

For citation: Korotkov V. F., Zyryanov R. S. Pulse Sequence Division in Mixed Signal Flow. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii Rossii. Radioelektronika* [Journal of the Russian Universities. Radioelectronics]. 2017, no. 3, pp. 5–10. (In Russian)

Vladimir F. Korotkov – D.Sc. in Engineering (2005), SRF (1998), lead engineer of "Special Technology Center" Ltd (Saint Petersburg). The author of 58 scientific publications. Area of expertise: passive location; analysis and processing of location signals.

E-mail: diofant2912@mail.ru

Roman S. Zyryanov – bachelor on nanotechnologies and micro system technics (2015), 2nd year Master's Degree student of Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI". The author of 6 scientific publications. Area of expertise: big data; data mining; image fractal analysis.

E-mail: roman.tm.z@gmail.com

УДК 621.391:621.396.96

Д. И. Попов

Рязанский государственный радиотехнический университет

Анализ систем обработки многочастотных сигналов

Проведен сравнительный анализ характеристик систем межпериодной обработки многочастотного сигнала на фоне пассивных помех для различных вариантов объединения частотных каналов при когерентном режектировании помех и последующем некогерентном накоплении остатков режектирования.

Доплеровская фаза, многочастотные сигналы, обработка сигналов, пассивные помехи

Эффективное обнаружение сигналов движущихся целей на фоне коррелированных (пассивных) помех затрудняют так называемые слепые скорости цели [1], [2]. Применение многочастотных сигналов позволяет исключить эти скорости. Обработка многочастотных сигналов на фоне пассивных помех рассмотрена в [3], [4].

Эффективное обнаружение движущихся целей затрудняет также априорная неопределенность корреляционных характеристик пассивных помех. В связи с этим системы обработки необходимо строить по адаптивному принципу. В этом случае оптимальная обработка многочастотного сигнала в каждом частотном канале реализуется на основе адаптивного (к параметрам помехи)

матричного фильтра (АМФ) и неадаптивного многоканального (по доплеровской фазе сигнала) фильтра, вычисляющего дискретное преобразование Фурье выходных отсчетов АМФ [3]. При этом сигнал от движущейся цели попадает в различные доплеровские тракты каждого из частотных каналов, что исключает возможность объединения последних. Решение о наличии сигнала принимается раздельно в доплеровских трактах каждого частотного канала по результатам сравнения с пороговыми уровнями обнаружения. В то же время актуальными для практики являются системы с объединением частотных каналов.

В [5] рассмотрены характеристики обнаружения систем обработки многочастотного сигнала на