

Отсюда точность пеленгования соответственно оценивается величинами

$$\sigma_{\Theta_{аз}}=0,027 \text{ рад}, \sigma_{\Theta_{ум}}=0,013 \text{ рад}.$$

Из сравнения видно, что при использовании моноимпульсной ПРЛ, точность определения угловых координат улучшается примерно в два раза.

**Заключение.** Рассмотрены особенности использования моноимпульсного метода измерения угловых координат в посадочных радиолокаторах радиолокационных систем посадки.

Отмечается, что точность пеленгования в моноимпульсной ПРЛ при амплитудном методе зависит от угла смещения максимума диаграммы направленности относительно равносигнального направления.

Показано, что для использования в ПРЛ в качестве угла смещения целесообразно взять угол, соответствующий максимуму произведения суммарной диаграммы и крутизны разностной диаграммы с учетом возможного компромисса между дальностью действия и точностью пеленгования.

### Библиографический список

1. Дудник П. И. Авиационные радиолокационные устройства. М.: ВВИА, 1976.
2. Антенны и устройства СВЧ / под ред. Воскресенского Д.И. М.: Радио и связь, 1981.
3. Леонов А. И., Фомичев К. И. Моноимпульсная радиолокация. М.: Радио и связь, 1976.
4. Абраров А. Т. Методика обоснования и расчета основных ГТХ средств РТО полетов. Тамбов: ТВВАИУ, 1991.
5. Тесля Е. Ю. Моноимпульсный измеритель угловых координат воздушных судов в посадочном радиолокаторе // Сб.НТК ВНО ТВАИИ. Тамбов: 2001.

УДК 621.396.96 : 621.391

### ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ИНДУСТРИАЛЬНЫХ ПОМЕХ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ СЖАТИЕ ФАЗОМАНИПУЛИРОВАННЫХ СИГНАЛОВ В ПЕРВИЧНЫХ РЛС

В. А. Ненашев, В. А. Сеницын, С. А. Страхов

*Балтийский государственный технический университет «Военмех» им. Д. Ф. Устинова  
АО «ВНИИРА», г. Санкт-Петербург*

**Введение.** В настоящее время в интересах повышения помехоустойчивости каналов радиолокационных систем находят широкое применение методы сжатия сложных сигналов, в частности сигналов с фазовой модуляцией (ФМ) [1-4]. Применение ФМ сигналов позволяет существенно повысить помехоустойчивость радиолокационных каналов. Применяются ФМ-сигналы модулированные кодом Баркера, М-последовательностью или случайным равномерным законом распределения.

Модулированные сигналы используются для обеспечения помехоустойчивости. Однако, в радиолокационном канале на сигнал воздействуют разного рода помехи, что может привести к сбоям радиолокационном канале. Воздействие промышленных помех на сигнал, негативно влияет на результат сжатия, из-за чего на индикаторе появляются ложные цели.

Целью работы является исследование влияния промышленных импульсных помех на характеристики сжатия ФМ сигналов при решении задачи помехоустойчивости в радиолокационных каналах. Для проведения исследования влияния промышленных помех, рассматрива-

ются импульсы с фазовой модуляцией. Имитируется влияние помехи, когда у целого элементарного импульса ФМ сигнала случайным образом меняется его начальная фаза.

**Модель ФМ сигнала и алгоритм сжатия.** Математическая модель ФМ сигнала представляет собой последовательность примыкающих элементарных (простых) импульсов одинаковой формы длительностью  $t_{II}$  начальными фазами высокочастотного заполнения которых могут принимать заданные дискретные значения. Будем считать число возможных значений  $p=2$ , т.е. рассматривать бинарную фазовую модуляцию. При длительности ФМ – сигнала, равной  $T_s$ , число элементарных импульсов равно  $N = T_s/t_{II}$ . Элементарные импульсы ФМ – сигнала обычно имеют форму, близкую к прямоугольной. При этом амплитуды элементарных импульсов равны, а начальная фаза принимает значения  $0$  либо  $\pi$ . Тогда последовательность значений начальной фазы высокочастотного заполнения элементарных импульсов  $\{\varphi_i, i = \overline{1, N}\}$  можно определить последовательностью чисел  $\{d_i, i = \overline{1, N}\}$ , принимающих значения  $0$  и  $1$ : если  $\varphi_i = 0$ , то  $d_i = 0$ ; если  $\varphi_i = \pi$ , то  $d_i = 1$  [5, 6].

Для простоты, на данном этапе, будем считать амплитуду элементарного импульса  $A_i = 1$ . Огибающую ФМ – сигнала можно представить в виде

$$\dot{S}(t) = \sum_{i=1}^N U_0 [t - (i-1)t_{II}] \exp\{j\pi d_i\} \quad (1)$$

где огибающая единичного импульса

$$U_0(t) = \begin{cases} 1, & 0 \ll t \ll t_{II} \\ 0, & \text{в остальных случаях} \end{cases}$$

Учитывая, что

$$\exp\{j\pi d_i\} = \begin{cases} 1, & d_i = 0, \\ -1, & d_i = 1, \end{cases}$$

Выражение (1) можно переписать в виде:

$$\dot{S}(t) = \sum_{i=1}^N (-1)^{d_i} U_0 [t - (i-1)t_{II}] = \sum_{i=1}^N \theta_i U_0 [t - (i-1)t_{II}], \quad (2)$$

где  $\theta_i = (-1)^{d_i}$

Из (1) следует, что свойства ФМ – сигнала определяются свойствами последовательности  $\{\theta_i, i = \overline{1, N}\}$ . Поэтому синтез ФМ – сигнала обычно состоит в выборе  $\{\theta_i\}$ . А так как огибающая сигнала на выходе согласованного фильтра определяется корреляционной функцией сигнала, на который он настроен, то определяющим при выборе кодирующей последовательности является ее корреляционная функция, которая должна обладать необходимыми свойствами, в частности, заданным уровнем боковых лепестков и шириной главного лепестка [6].

В качестве последовательности  $\{\theta_i\}$  могут использоваться коды Баркера, М – последовательности и т.п. В радиолокационных системах наибольшее распространение получили коды Баркера, которые представляют собой двоичные последовательности конечной длины.

Данные коды существуют только для длины  $N$ , равной  $2, 3, 4, 5, 7, 11, 13$ . Тринадцатиэлементный код Баркера приведен на рис. 1(а), а огибающая и ФМ – сигнал на рис. 1(б) и 1(в) соответственно.

Алгоритм сжатия ФМ сигнала осуществляется во временной или в частотной областях.

Процедурой сжатия импульса при приеме во временной области обеспечивается либо согласованной фильтрацией, либо корреляционной обработкой.

Выходной сигнал согласованного фильтра выражается через временной отклик кодирующего фильтра. Это выражение определяется линейной сверткой сигнала  $h(t)$  с импульсным откликом  $h(-t)$  согласованного фильтра.

Линейная свертка во временной области эквивалентна умножению в частотной области. При этом целесообразно использовать быстрое преобразование Фурье для увеличения быстродействия процесса вычислений [7].

Алгоритм сжатия фазоманипулированного сигнала в частотной области состоит из следующих шагов.

**Шаг 1.** Вычислить спектр принятого эхо-сигнала и его копии с помощью применения операции быстрого преобразования Фурье.

**Шаг 2.** Выполнить операцию комплексного умножения между спектром эхо-сигнала и спектром копии сигнала, полученные на шаге 1.

**Шаг 3.** Применить операцию обратного быстрого преобразования Фурье к результату умножения на шаге 2.

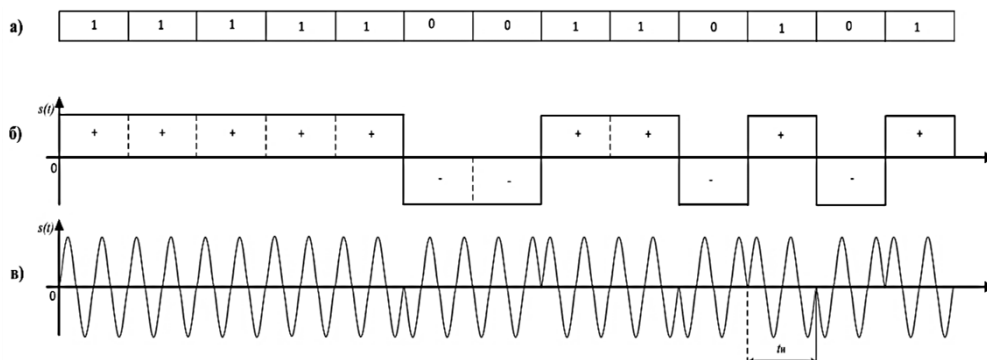


Рис. 1. Сигнал модулированный кодом Баркера 13 (а); огибающая ФМ – сигнала (б); ФМ – сигнал (в)

Таким образом, осуществляется алгоритм сжатия ФМ сигнала. Ширина сжатого импульса на уровне половины амплитуды номинально равна длительности элементарного импульса. Следовательно, разрешение по дальности пропорционально длительности одного элементарного кода.

**Модель помехи.** Параметры вмешательства будут влиять на результат сжатия. Для исследования характеристик сжатия при возникновении внешнего воздействия на радиолокационный канал, необходимо сформулировать модель помехи.

Известны модели помехописывающиеся с помощью статистических характеристик. Наиболее полной характеристикой является  $n$ -мерная плотность вероятности [8]. Однако, при воздействии помех, которые имеют самостоятельный источник, они не могут описываться вероятностными законами распределения, поскольку непосредственно вносят искажение в частоту, амплитуду или фазы одного или нескольких элементарных импульсов последовательности ФМ сигнала.

Предлагается модель импульсной помехи, которая заключается в искажении начальной фазы одного или нескольких элементарных импульсов, выбранных случайным образом (рис. 2). Количество искаженных элементарных импульсов зададим самостоятельно. Амплитуда ФМ сигнала помехи должна быть соизмеримой с амплитудой неискаженных. Либо принятый эхо-сигнал, следует пропускать через ограничитель амплитуды до осуществления процесса сжатия. Основной характеристикой при сжатии ФМ-сигнала являются начальные фазы элементарных импульсов, поэтому, имитируя влияние импульсной помехи, следует ее изменять случайным образом в диапазоне от  $0$  до  $2\pi$ .

**Исследование влияния импульсной помехи на алгоритм сжатия эхо-сигнала.** Для исследования влияния импульсной помехи методом имитационного моделирования необходимо сгенерировать сложный сигнал модулированный кодом Баркера 13. Проимитировать влияние импульсной помехи на сгенерированный сигнал, описанной в предыдущем разделе и осуществить процесс сжатия. Затем оценить результаты, а именно отношение пикового значения боковых лепестков к амплитуде основного пика при разном количестве искажаемых импульсов. Для достоверности проведем 10000 экспериментов и усредним оцениваемый результат.

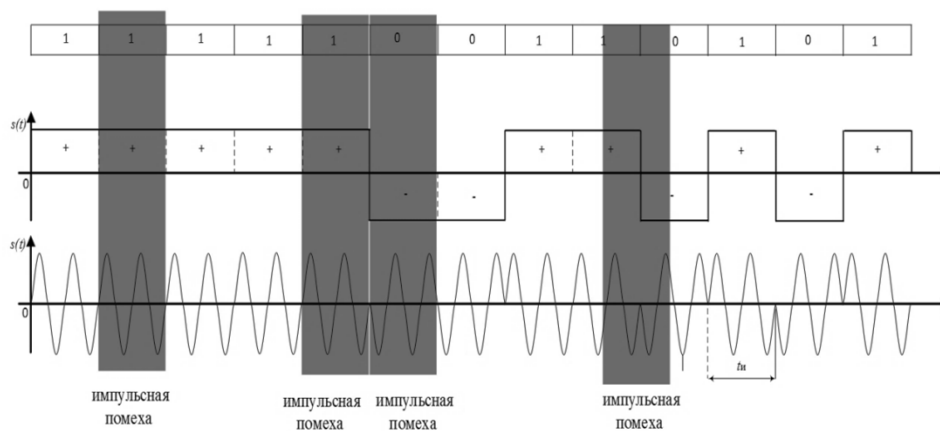


Рис. 2. Влияние импульсной помехи на 4 элементарных импульса ФМ сигнала, стоящих рядом модулированном кодом Баркера 13

В результате наблюдаем, что при отсутствии влияния импульсной помехи, отношение пикового значения боковых лепестков к амплитуде основного пика равно теоретическому значению, т. е. тринадцати. Однако, на графике (рис. 3) наблюдаем, что с возрастанием процента искаженных элементарных импульсов оцениваемое отношение экспоненциально убывает, это связано с ростом пиковых значений боковых лепестков и уменьшением амплитуды основного сжатого импульса.

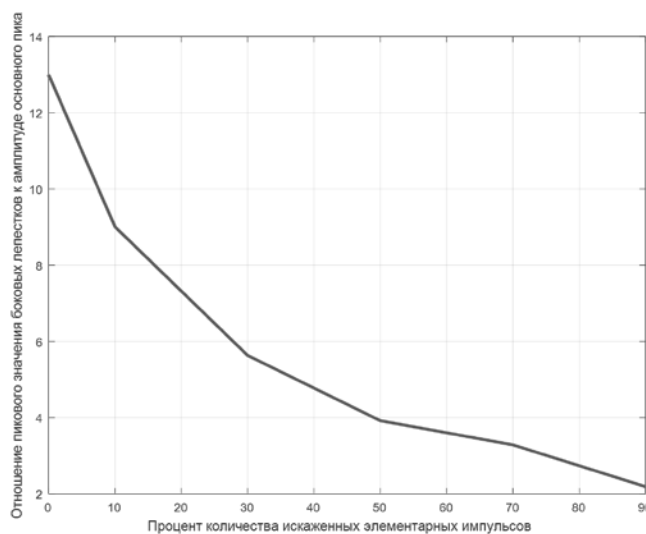


Рис. 3. Результат влияния импульсной помехи на алгоритм сжатия ФМ-сигнала

Следует отметить влияние помехи и на другую характеристику результата сжатия, а именно рассчитанное расстояние до цели для ФМ сигнала. На рисунке 6 наблюдаем значительное искажение сжатого импульса. На месте (60 км), где должно быть максимальное значение сжатого импульса наблюдается провал, что свидетельствует о том, что цель обнаружена не будет или попадет в соседний дискрет дальности.

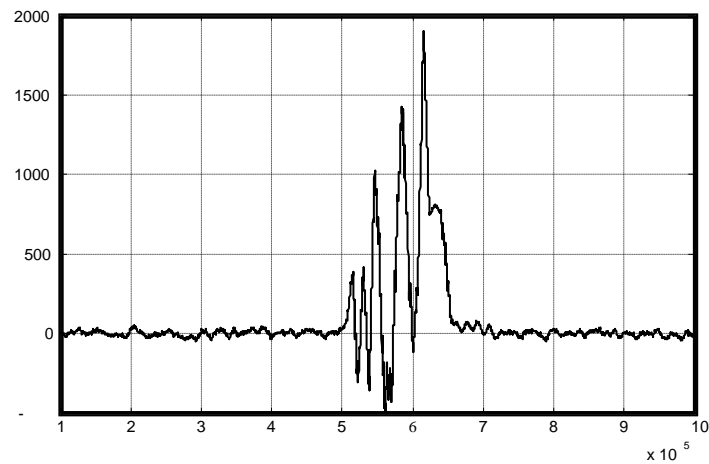


Рис.6. Результат сжатия

**Выводы.** Рассмотрена модель радиолокационных эхо-сигналов с фазовой модуляцией применяемых в импульсных РЛС. Описана модель промышленных помех для ФМ сигналов. Представленные модели ФМ сигнала и импульсной помехи, обеспечивают проведение моделирования процедуры сжатия в условия внешнего воздействия. Выполненная оценка параметров алгоритма сжатия ФМ сигналов в условиях действия промышленных импульсных помех, показала, что с возрастанием искаженных элементарных импульсов отношение экспоненциально убывает. Результаты моделирования, полученные в данной работе, имеют важное теоритическое и практическое значение при исследованиях связанных с помехозащищенностью зондирующего сигнала в радиолокационных каналах и выбором характеристик РЛС в условиях сложной электромагнитной обстановки.

#### Библиографический список

1. Трухачев А. А. Радиолокационные сигналы и их применение. М. Военное издательство. 2005.
2. Радиолокационные системы многофункциональных самолетов. Т. 1. РЛС-информационная основа боевых действий многофункциональных самолетов. Системы и алгоритмы первичной обработки радиолокационных сигналов / под ред. А. И. Канащенкова и В. И. Меркулова. М.: Радиотехника, 2006.
3. Mahafza B. R. Radar Systems Analysis and Design Using MATLAB. CHAPMAN & HALL/CRC, 2000.
4. Шенета А. П., Ненашев В. А. Система сжатия ФМ импульса в задачах высокоточного картографирования // Хроники объединенного фонда электронных ресурсов. Наука и образование. 2014. № 10 (65). С. 14.
5. Шенета А. П., Каплин А. Ю., Ненашев В. А., Юдин И. А. Моделирование алгоритма сжатия ФМ сигнала при влиянии активной помехи для решения задач помехоустойчивости // Свид. о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2016618938 от 10.08.2016 г.
6. Дудник П. И., Ильчук А. Р., Татарский Б. Г. Многофункциональные радиолокационные системы. М: Дрофа, 2007.
7. Финкельштейн М. И. Основы радиолокации: Учебник для вузов. М: Радио и связь, 1983.
8. Борисов В. И. и др. Помехозащищенность систем радиосвязи с расширением спектра сигналов методом псевдослучайной перестройки рабочей частоты. М.: Радио и связь, 2000.