

## МЕТОДЫ ФОРМИРОВАНИЯ И ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ С БОЛЬШОЙ БАЗОЙ.

*Кузьмичев В.Е, Соколов А.В.*

*Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН*

*E-mail: [sav@cplire.ru](mailto:sav@cplire.ru)*

*Сипугин Д.В.*

*3 ЦНИИ МО РФ*

*Приводятся результаты анализа методов формирования и обработки сигналов с большой базой. Предлагается типовой сигнал на основе тактико-технических характеристик и условий работы РЛС.*

К числу наиболее важных факторов, определяющих выбор того или иного конкретного типа сигнала, относятся следующие факторы: дальность действия РЛС, диапазон исследуемых доплеровских частот, уровень боковых лепестков, отношение сигнал/шум, наличие пассивных и активных помех.

Специфика работы РЛС РНЦ заключается в том, что обнаружение наземных целей практически всегда производится на фоне подстилающей поверхности и местных предметов. При этом, ввиду относительно малых размеров объектов и значений их ЭПР, а также большого динамического диапазона уровня отражений от подстилающей поверхности, особые требования предъявляются к боковым лепесткам автокорреляционной функции зондирующего сигнала.

Известно, что формирование сложных сигналов с большой базой возможно на основе использования амплитудной, частотной или фазовой модуляции сигналов. С энергетической точки зрения амплитудная модуляция уступает фазовой и частотной и практически не используется в РЛС.

Применительно к фазовой и частотной модуляциям методы формирования и обработки можно разделить на два основных класса: активные и пассивные.

Активное формирование сигналов производится с помощью фазовой или частотной модуляции несущей. При этом реального растяжения сигнала во времени не происходит.

Пассивное формирование растянутого во времени кодированного сигнала осуществляется с помощью возбуждения некоторого устройства или схемы короткими импульсами.

При активной обработке реализуется корреляция между принятым сигналом и задержанными копиями передаваемого сигнала (корреляционная обработка). При пассивной обработке реализуется согласованная фильтрация, причем в качестве согласованного фильтра используется схема сжатия, сопряженная со схемой растяжения.

Основные характеристики различных методов формирования и обработки сложных сигналов приведены в табл. 1.

Анализ данных, приведенных в табл. 1., показывает, что с точки зрения уровня разработки методов формирования и обработки, возможности подавления пассивных помех и уровня боковых лепестков методы, основанные на фазовом кодировании, выгодно отличаются от методов с частотной модуляцией. Кроме того, возможность изменения ширины полосы, длительности импульсов и кодов ФКМ сигналов позволяет реализовать псевдошумовой зондирующий сигнал, что особенно важно для РЛС с повышенной скрытностью и помехоустойчивостью.

Сигналы с кодированием по фазе отличаются от ЧМ сигналов тем, что в них длинный импульс разбивается на некоторое число более коротких подимпульсов. Все подимпульсы имеют равную длительность; каждый подимпульс передается с определенным значением фазы в соответствии с фазовым кодом.

В настоящее время в РЛС для кодирования фазы зондирующего сигнала широко используются коды Баркера и последовательности максимальной длительности.

Коды Баркера являются оптимальными кодами. Их оптимальность заключается в том, что амплитуда пика автокорреляционной функции равна  $N$ , а значения боковых лепестков -  $1$ , где  $N$  - число элементов или длина кода. Существенным недостатком, ограничивающим возможность их использования для кодирования сигналов в скрытных РЛС, является малая длина кода, так как до сих пор не найдено кодов Баркера длиной более 13 элементов.

Структура последовательностей максимальной длительности аналогична структуре случайных последовательностей и, следовательно, они обладают необходимыми автокорреляционными функциями. Для их формирования используют генераторы на регистрах сдвига с линейными обратными связями, которые являются простыми и удобными устройствами.

Длина максимальной последовательности равна  $N=2^{n-1}$ , где  $n$  – число каскадов в генераторе. Общее число последовательностей максимальной длительности, которое можно сформировать генератором с  $n$  каскадами, равно

$$M = \frac{N}{n} \cdot \prod_i \left(1 - \frac{1}{p_i}\right)$$

где  $p_i$  - простые множители числа  $N$ .

Сдвиг значений по каскадам регистра осуществляется с темпом, определяемым тактовой частотой. При этом на выходе любого каскада образуется бинарная последовательность.

В табл.2 указаны длины и число последовательностей максимальной длительности, которые могут быть сформированы генераторами на регистрах сдвига с различным числом каскадов.

Таблица 2.

Последовательности максимальной длительности

<i>Число каскадов</i>	<i>Длина последовательности максимальной длительности</i>	<i>Число последовательностей максимальной длительности</i>	<i>Номера каскадов, охваченных обратной связью</i>
<b>2</b>	3	1	2, 1
<b>3</b>	7	2	3, 2
<b>4</b>	15	2	4, 3
<b>5</b>	31	6	5, 3
<b>6</b>	63	6	6, 5
<b>7</b>	127	18	7, 6
<b>8</b>	255	16	8,6,5,4
<b>9</b>	511	48	9,5
<b>10</b>	1023	60	10, 7
<b>11</b>	2047	176	11, 9
<b>12</b>	4095	144	12,11,8,6
<b>13</b>	8191	630	13,12,10,9
<b>14</b>	16383	756	14,13,8,4
<b>15</b>	32767	1800	15,14
<b>16</b>	65535	2048	16,15,13,4
<b>17</b>	131071	7710	17,14
<b>18</b>	262143	7776	18,11
<b>19</b>	524287	27594	19,18,17,14
<b>20</b>	1048575	24000	20,17

Примером реализации РЛС с таким зондирующим сигналом является отечественная РЛС РНДЦ СБР-3. В качестве исходной в этой РЛС используется последовательность максимальной длительности с числом элементов в коде  $N=1023$ .

Длительность элемента кода в данной РЛС равна 0,33 мкс ( $\Delta R=50$ м), что соответствует ширине спектра сигнала порядка 6 МГц. Мощность зондирующего сигнала равна 60 мВт.

Указанные параметры сигнала и непрерывный режим его излучения не обеспечивают РЛС СБР-3 требуемой скрытности работы и помехоустойчивости. При этом дальность действия РЛС не может превышать 4...5 км. Указанные ограничения обусловлены в первую очередь невозможностью обеспечения требуемой развязки между ее приемным и передающим трактами при работе с одной антенной.

Таким образом, с учетом данных, приведенных в разделе 1.4. можно сделать вывод, что в РЛС РНЦ с повышенной помехозащищенностью могут использоваться как шумовые сигналы, создаваемые с помощью прямошумовых генераторов, так и ФКМ сигналы на основе использования последовательностей максимальной длительности. Выбор того или иного сигнала определяется возможностью их формирования и обработки цифровыми методами в требуемой полосе частот.

Таблица 1 - Основные характеристики методов формирования и обработки сложных сигналов

Характеристики	Линейная ЧМ		Нелинейная ЧМ		Фазовое кодирование	
	активная	пассивная	активная	пассивная	активная	пассивная
Перекрываемый диапазон дальностей	Ограниченный диапазон дальностей на одну схему активной корреляции	Обеспечивает покрытие всего диапазона дальностей	Ограничивается одной ячейкой разрешения на схему активной корреляции	Обеспечивает покрытие всего диапазона дальностей	Ограничивается одной ячейкой разрешения на схему активной корреляции	Обеспечивает покрытие всего диапазона дальностей
Перекрываемый диапазон доплеровских частот	Перекрывают широкий диапазон доплеровских частот, но при этом вносятся ошибки измерения дальности. При больших доплеровских сдвигах ухудшается отношение сигнал/шум и возрастает уровень боковых лепестков		Необходимо использовать большое число доплеровских каналов, центральные частоты которых различаются на $1/T_a$ (Гц)			
Уровень боковых лепестков по дальности	Для уменьшения уровня боковых лепестков ниже их уровня для функции $\sin X/X$ на оси дальности необходима весовая обработка		Возможно получение достаточно низкого уровня боковых лепестков на оси дальности. Уровень боковых лепестков определяется параметрами сигнала, выбираемого при разработке.		Достаточно низкий уровень боковых лепестков. Для кода с $N$ элементами этот уровень равен $N^{-5/2}$ .	
Возможности изменения формы сигнала	Ширину полосы и длительность импульса можно изменить	Для каждой схемы сжатия возможны единственные значения параметра	Ширину полосы и длительность импульса можно изменить	Для каждой схемы сжатия возможны единственные значения параметра	Ширину полосы, длительность импульсов и используемый код можно изменить	
Возможности по подавлению пассивных помех	Плохие характеристики подавления		Хорошие характеристики подавления		Хорошие характеристики подавления	
Отношение сигнал/шум	Уменьшается из-за весовой обработки и неравномерности зависимости потерь от дальности	Уменьшается из-за весовой обработки	Уменьшается из-за неравномерности зависимости потерь от дальности	Уменьшение не происходит	Уменьшается из-за неравномерности зависимости потерь от дальности	Уменьшение не происходит
Замечания	1. Используется ограниченно 2. Формирование сигналов не вызывает затруднений	1. Используется широко 2. Методы формирования хорошо разработаны	1. Используется ограниченно 2. Формирование сигналов вызывает затруднения	1. Используется ограниченно 2. Методы формирования крайне слабо разработаны	1. Используется широко 2. Формирование сигналов чрезвычайно простое	1. Используется ограниченно 2. Формирование сигналов вызывает умеренные затруднения