

## Методика формирования ансамблей широкополосных сигналов для увеличения скорости передачи информации

И.З. Климов, А.Н. Копысов, А.М. Чувашов

ГОУ ВПО Ижевский государственный технический университет, kan\_kan@istu.ru

*Исследованный метод передачи сложных сигналов по каналам связи декаметрового диапазона позволяет в значительной степени устранить влияние основных мешающих факторов канала на качество передачи информации. Однако при сравнительно широкой полосе радиоканала метод характеризуется относительно не большой скоростью передачи информации. Поэтому возникает необходимость в рассмотрении возможностей уплотнения канала связи.*

*Investigated method transmit compound signal by communications channels decameter range to let to a great extent remove to influence pacing interfering factor the channel on information transfer property. However, under relatively wide band radio channel this method be characterized by relatively small information rate. And so be in existence necessity in the case an opportunity of these communications channel compression.*

Уплотнение радиоканала позволяет решить 2 задачи: повысить эффективность использования полосы частот, и повысить скорость передачи информации. Особый интерес решение такой задачи представляет для декаметрового канала, занимающего сравнительно небольшой интервал частот.

Возможности повышения скорости передачи за счет уменьшения длительности сигнала имеет 2 ограничения. Во-первых, при фиксированной ширине полосы частот канала уменьшение длительности сигнала ведет к пропорциональному снижению базы сигнала [1]. Уменьшения базы сигнала ограничено требованиями к корреляционным характеристикам сигнала. Во-вторых, длительность сигнала ограничена снизу возможностью эффективного разделения лучей сигнала.

Так как сложные широкополосные сигналы [1] относятся к классу ортогональных сигналов, то уплотнение канала может быть обеспечено за счет использования разделения сигналов по форме. Канал с разделенными входами позволяет работать в общей полосе частот одновременно нескольким корреспондентам. Кроме повышения загрузки полосы частот этот вариант построения канала связи с уплотнением обеспечивает снижение возможности несанкционированного доступа.

Необходимо отметить, что организация нескольких параллельных потоков информации в широкополосном канале с шумоподобными сигналами приводит к тому, что сигнал в полосе канала становится по своим параметрам близким к шуму. Так как для сигнала характерна низкая спектральная плотность и отсутствие явно выраженных тактовых частот, то его обнаружение на фоне естественных помех является существенно более сложной задачей, по сравнению с обнаружением простых сигналов.

Так как обычно варианты сложных сигналов [2] не являются полностью ортогональными сигналами, то при размещении в общей полосе частот нескольких сигналов, будет иметь место взаимное влияние сигналов на качество передачи информации. Показателем такого влияния может быть взаимная корреляция сигналов, используемых для разделения потоков информации в общей полосе частот.

Предположительно влияние селективных замираний на параллельные потоки будет различным, вследствие того, что варианты сигналов имеют различающиеся энергетические спектры. Поэтому можно ожидать, что для ошибок в приеме параллельных потоков не будет наблюдаться наличия существенной корреляции.

Организация параллельных потоков выполняется с целью повышения скорости передачи исходного потока. В этом случае корреляция ошибок может трансформироваться в группирование ошибок в передаче исходного потока информации. Группирование ошибок приводит к резкому снижению эффективности исправляющих кодов, и не будет рассматриваться в этой статье.

Таким образом, для решения проблемы уплотнения широкополосного канала на основе использования сложных сигналов необходимо оценить степень взаимного влияния сложных сигналов.

Влияние дополнительного отклика на прием сигнала, который соответствует образцу, использованному при вычислении отклика, определяется не абсолютным значением мощности дополнительного отклика, а его относительным значением, определяемым по отношению к мощности полезной составляющей отклика. Вариации начальных фаз сигналов не оказывают влияния на величину модуля их взаимной корреляции. Поэтому информационная фазовая манипуляция сигналов параллельных потоков не влияет на мощности компонент дополнительного отклика. При равной мощности сигналов, используемых для параллельной передачи потоков информации, относительное значение мощности дополнительных, мешающих откликов будет определяться как сумма квадратов нормированных модулей откликов на данный образец образцов других сигналов группы. Таким образом, взаимное влияние сигналов в суммарном исчислении определяется через нормированные взаимные корреляционные функции сигналов группы [3].

Результаты вычисления взаимного влияния вариантов, полученных для 2-х значений базы предлагаемого для использования широкополосного сигнала, представлены в таблице 1.

Таблица 1. Распределение уровней взаимной корреляции сигналов

Характеристика	$B_S = 512$	$B_S = 256$
Минимальное значение	$1.43 \cdot 10^{-8}$	$1.64 \cdot 10^{-8}$
Максимальное значение	0.0062	0.0097
Среднее значение	$4.46 \cdot 10^{-4}$	$9.53 \cdot 10^{-4}$

Данные таблицы 1 получены для кода порождающей последовательности равного 864 и 10 разрядах регистра формирования неповторяющихся чисел при 1024 отсчетах сигнала. Они представляют максимальное, минимальное и среднее значение нормированной величины квадрата модуля взаимного отклика пары сигналов, определяемые для некоторого ограниченного ансамбля сигналов. Анализ таблицы 1 показывает, что уровень взаимной корреляции по ансамблю сигналов изменяется в широких пределах: различие максимального и минимального уровней взаимной корреляции составляет 5 порядков. Уменьшение базы сигнала приводит к росту взаимного влияния, который для среднего значения взаимной корреляции практически пропорционален изменению базы. Однако максимальный и минимальный уровни взаимной корреляции изменяются значительно медленнее, чем база сигнала. Полученное среднее значение взаимной корреляции сигналов с базой  $B_S \geq 256$  ниже уровня  $-30$  дБ.

При реализации параллельных каналов с использованием ортогональных сигналов взаимное влияние каналов может быть ограничено на уровне ниже средних характеристик. Подбор вариантов сигнала по критерию минимальной взаимной корреляции является сложной задачей. При больших значениях базы сигнала поиск должен осуществляться по очень большому пространству. Действительно, число вариантов сигнала оценивается значением факториала его базы. Поэтому при

организации  $K_p$  параллельных каналов возможное число вариантов сигналов равно числу сочетаний группы из  $K_p$  по числу вариантов сигнала  $V_S$ .

Следовательно, необходимо выбрать варианты из объема, определяемого как:

$$W_S = \frac{\prod_{m=0}^{K_p-1} (V_S - i = m)}{K_p!} = \prod_{m=0}^{K_p-1} \frac{V_S - m}{m+1}. \quad (1)$$

При больших значениях базы сигнала объем ансамбля  $V_S$  (определяется значением факториала базы) является очень большой величиной. На рисунке 1 приведены графики зависимости (1) от объема ансамбля сигналов, построенные для 2-х значений размера группы  $K_p$ . Они показывают, что число вариантов (1) быстро возрастает с увеличением  $V_S$  и  $K_p$ , и даже при относительно небольших объемах ансамбля и размере группы число вариантов очень велико. Так при  $V_S = 1\,000$  имеет место  $10^{13}$  вариантов при размере группы 5 и  $10^{23}$  при размере 10. При объеме ансамбля  $V_S = 10\,000$  число вариантов возрастает на 5 порядков для размера группы 5 и - на 10 порядков при размере 10.

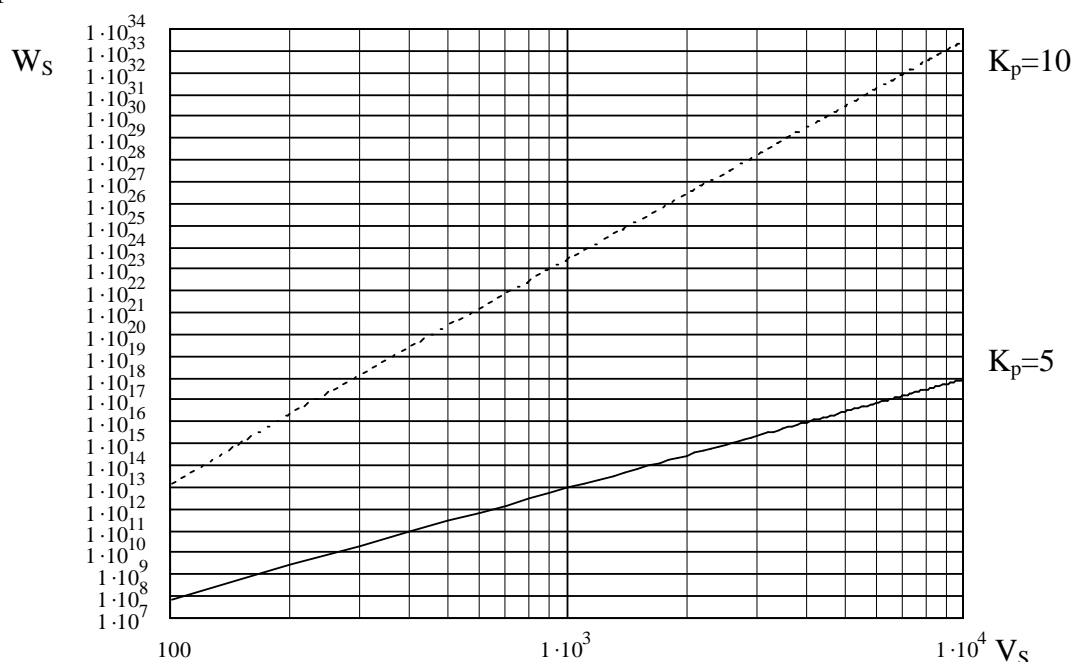


Рис. 1. Зависимость числа вариантов групп сигналов от размера ансамбля

Задача поиска варианта группы сигналов с минимальным взаимным влиянием решалась на ограниченном объеме ансамбля сигналов с использованием следующего алгоритма. На первом шаге вычислялась матрица значений взаимной корреляции пар сигналов ансамбля. Далее на основе этой матрицы последовательно определялись сигналы, которые удовлетворяли требованиям к группе. Сначала определялась пара сигналов с минимальной взаимной корреляцией, которая выбиралась как основа группы. Затем к этим определенным элементам группы находился сигнал, который соответствовал минимальной суммарной корреляции по отношению к определенным ранее сигналам. Таким образом, реализовался последовательный процесс подбора вариантов сигнала, которые характеризуются минимальным суммарным влиянием по отношению к определенным на предыдущем этапе подбора элементам группы, до достижения требуемого размера группы.

В таблице 2 представлены результаты формирования группы вариантов сигнала для 2-х значений базы и размера группы, полученные для разрядности регистра ПСП равной 10 и кода коэффициентов 864. Здесь варианты группы задаются значениями начального состояния регистра ПСП.

Таблица 2. Результаты распределения групп вариантов сигналов

5 сигналов				10 сигналов			
$B_S = 512$		$B_S = 256$		$B_S = 512$		$B_S = 256$	
Вариант	Влияние	Вариант	Влияние	Вариант	Влияние	Вариант	Влияние
8	$10^{-4}$	44	$2 \cdot 10^{-4}$	8	$5 \cdot 10^{-4}$	21	$1.3 \cdot 10^{-3}$
54	$10^{-4}$	46	$2 \cdot 10^{-4}$	54	$7 \cdot 10^{-4}$	44	$6 \cdot 10^{-4}$
102	$10^{-4}$	64	$6 \cdot 10^{-4}$	102	$4 \cdot 10^{-4}$	46	$2.1 \cdot 10^{-3}$
365	$10^{-4}$	70	$3 \cdot 10^{-4}$	112	$7 \cdot 10^{-4}$	49	$1.6 \cdot 10^{-3}$
430	$10^{-4}$	88	$4 \cdot 10^{-4}$	163	$5 \cdot 10^{-4}$	64	$1.5 \cdot 10^{-3}$
-	-	-	-	181	$7 \cdot 10^{-4}$	70	$1.1 \cdot 10^{-3}$
-	-	-	-	448	$6 \cdot 10^{-4}$	171	$1.2 \cdot 10^{-3}$

Оценки, представленные в таблице 2, показывают, что рассмотренный алгоритм позволяет получать группы сигналов с относительно небольшим уровнем взаимного влияния. Для группы сигналов с минимальным взаимным влиянием этот уровень при базе сигнала  $B_S = 512$ , даже при размерности группы 10 сигналов, сопоставим со средним значением взаимной корреляции пары сигналов. При базе  $B_S = 256$  взаимное влияние выше, чем при базе  $B_S = 512$ , и примерно пропорционально изменению значения базы. Однако даже в этом случае уровень взаимного влияния лишь несколько выше среднего значения взаимной корреляции пары сигналов, и существенно ниже максимального значения взаимной корреляции пары сигналов. Сигналы в группе различаются по уровню влияния на них других элементов. Вариации этой характеристики в группе не очень значительны и уменьшаются с ростом базы сигнала.

Рассмотренный алгоритм позволяет получать только одну группу сигналов для заданного ограниченного ансамбля сигналов. Однако на его основе можно получить ряд таких групп. Во-первых, можно варьировать числом разрядов ПСП и её кодом, изменяя, таким образом, рассматриваемый ограниченный ансамбль сигналов. При большом числе разрядов ПСП существует большое число кодов порождающей последовательности. Во-вторых, в рамках каждой конкретной последовательности можно получать ряд групп, если сделать продолжение алгоритма поиска. Действительно, после определения очередной группы можем определять новую начальную пару сигналов, которая отличается от начальных пар предшествующих поисков, и выполнять подбор новой группы. В таблице 3 представлены оценки вероятности того, что при 10 разрядах ПСП и коде 864 (1023 варианта сигнала) уровень взаимной корреляции пары сигналов не превысит значения, задаваемого относительно средней величины по данной выборке.

Таблица 3. Распределение вероятности не превышения заданного уровня взаимными корреляциями сигналов в группе

Уровень относительно среднего	Вероятность не превышения уровня	
	$B_S = 512$	$B_S = 256$
1	0.6643	0.6554
0.5	0.4497	0.4434
0.25	0.2747	0.2818
0.125	0.156	0.1555

Из данных таблицы 3 следует, что распределение взаимной корреляции пар сигналов не является симметричным относительно среднего значения. Реализации уровня взаимной корреляции ниже среднего значения преобладают. При этом для 2-х значений базы, отличающихся в 2 раза, полученные распределения по уровням достаточно близки. Для того, чтобы оценить воздействие взаимного влияния сигналов на ограничение выбора вариантов, решена задача подбора вариантов с максимальным влиянием путем последовательного подбора по критерию максимума взаимной корреляции.

Для решения задачи оценки взаимного влияния сигналов группы на качество передачи было проведено исследование, для той же порождающей ПСП, а также определены сочетания вариантов с максимальным уровнем взаимного влияния. Полученные варианты представлены в таблице 4.

Таблица 4. Результаты распределения групп вариантов сигналов

5 сигналов				10 сигналов			
$B_s = 512$		$B_s = 256$		$B_s = 512$		$B_s = 256$	
Вариант	Влияние	Вариант	Влияние	Вариант	Влияние	Вариант	Влияние
58	$5.51 \cdot 10^{-3}$	87	$1.19 \cdot 10^{-2}$	58	$1.16 \cdot 10^{-2}$	8	$2.04 \cdot 10^{-2}$
65	$9.84 \cdot 10^{-3}$	93	$1.57 \cdot 10^{-2}$	61	$1.06 \cdot 10^{-2}$	13	$1.89 \cdot 10^{-2}$
441	$1.05 \cdot 10^{-2}$	206	$1.07 \cdot 10^{-2}$	65	$1.3 \cdot 10^{-2}$	69	$1.84 \cdot 10^{-2}$
477	$7.21 \cdot 10^{-3}$	208	$1.53 \cdot 10^{-2}$	85	$1.1 \cdot 10^{-2}$	87	$1.91 \cdot 10^{-2}$
505	$6.39 \cdot 10^{-3}$	247	$1.61 \cdot 10^{-2}$	99	$1.05 \cdot 10^{-2}$	93	$2.05 \cdot 10^{-2}$
-	-	-	-	238	$1.15 \cdot 10^{-2}$	115	$2.1 \cdot 10^{-2}$
-	-	-	-	441	$1.65 \cdot 10^{-2}$	206	$2.74 \cdot 10^{-2}$
-	-	-	-	505	$1.05 \cdot 10^{-2}$	248	$2.25 \cdot 10^{-2}$

Из сопоставления данных таблиц 2 и 4 следует, что уровень максимального взаимного влияния более чем на порядок превышает уровень минимального взаимного влияния. В целом уровень взаимного влияния в группе с максимальным влиянием примерно в 3 раза ниже величины произведения уровня максимальной корреляции пары сигналов на число сигналов в группе. Показано, что взаимное влияние сигналов в группе даже при размерности группы равной 10 относительно невелико, и существенное уплотнение широкополосного канала, основанное на использовании разделения параллельных потоков информации по форме сигнала возможно.

Результаты, полученные в процессе исследования вопроса уплотнения широкополосного канала связи, позволяют сделать следующие выводы:

1. Метод формирования широкополосных, сложных сигналов, обеспечивающих адаптацию к условиям КВ канала, позволяет получать большие ансамбли сигналов с хорошими взаимно корреляционными свойствами. Поэтому в общей полосе частот можно размещать группу сигналов, которые оказывают незначительное взаимное влияние, что позволяет реализовать ортогональное уплотнение информации, передаваемой по широкополосному КВ каналу.

2. Квазиортогональное уплотнение сложных сигналов с относительной фазовой манипуляцией позволяет реализовать как одновременную работу нескольких корреспондентов в общей полосе частот на один приемник, так и повышение скорости передачи информации по одной линии связи. Преимуществом ортогонального уплотнения при решении задачи значительного повышения скорости передачи является относительно небольшое число используемых сложных сигналов, по сравнению с использованием известных методов передачи дискретной информации ортогональными сигналами. Так при 10 ортогональных сигналах обеспечивается скорость передачи, соответствующая использованию  $2^{20}$  ортогональных сигналов той же длительности.

### **Литература**

1. Варакин Л. Е. Системы связи с шумоподобными сигналами. – М.: Радио и связь, 1985. – 384с.
2. Климов И.З., Копысов А.Н., Чувашов А.М. Обнаружение широкополосных сигналов с относительной фазовой телеграфией // Сверхширокополосные сигналы в радиолокации, связи и акустике: сб. докладов Второй Всероссийской научной конференции-семинара. – Муром: МИ ВлГУ, 2006. – С.291 – 296.
3. Вероятность и математическая статистика: Энциклопедия. / Под ред. Ю.В. Прохоров. – М.: Большая Российская энциклопедия, 1999 – 910с.