

УПЛОТНЕНИЕ ШИРОКОПОЛОСНОГО КАНАЛА СВЯЗИ ДЛЯ ПЕРЕДАЧИ ТЕЛЕМЕТРИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ

И.З. Климов, А.Н. Копысов, А.М. Чувашов
(ГОУ ВПО «Ижевский государственный технический университет»)

Исследованный метод передачи сложных сигналов по нестационарным каналам связи 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. Рассмотрена возможность уплотнения канала связи.

Ключевые слова: нестационарный канал связи, уплотнение радиоканала, широкополосный сигнал, широкополосный канал связи, корреляция сигналов.

Уплотнение радиоканала позволит решить две основные задачи: повысить эффективность использования (загрузки) полосы частот и повысить скорость передачи информации. Особый интерес решение такой задачи представляется для канала связи, занимающего сравнительно небольшой интервал частот.

Повышение скорости передачи за счет уменьшения длительности сигнала имеет ряд ограничений. Во-первых, при фиксированной ширине полосы частот канала уменьшение длительности сигнала ведет к пропорциональному снижению базы сигнала [1], что, в свою очередь, 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 источникам информации. 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 по своим параметрам становится близким к шуму. Так как для такого сигнала характерна низкая спектральная плотность и отсутствие явно выраженных тактовых частот, то его обнаружение на фоне естественных помех является более сложной задачей по сравнению с обнаружением простых сигналов.

Так как обычно варианты сложных сигналов [2] не являются абсолютными ортогональными сигнала-

ми, то при размещении в общей полосе частот нескольких сигналов будет иметь место взаимное влияние вариантов сигнала на качество передачи информации. Показателем такого влияния может служить взаимная корреляция сигналов, используемых для разделения потоков информации в общей полосе частот. В канале с общим входом синхронизация по задержке может быть общей для всех параллельных потоков информации. Поскольку потоки информации передаются по общему каналу, то влияние канала на все сигналы группы является идентичным.

Предположительно влияние селективных замираний на параллельные потоки будет различным, так как варианты сигналов имеют существенно 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 некоторого исходного потока, который в канале разделяется на несколько параллельных потоков тем или иным образом. В этом случае корреляция ошибок может трансформироваться в группирование ошибок в передаче исходного потока информации. Группирование ошибок приводит к резкому снижению эффективности исправляющих кодов. Поэтому вопрос корреляции ошибок в параллельных потоках требует отдельного исследования и не является предметом рассмотрения этой статьи.

Таким образом, для решения проблемы уплотнения широкополосного канала на основе использования сложных сигналов необходимо оценить степень взаимного влияния сложных сигналов, обеспечивающих эффективную адаптацию к факторам реального канала, в группе.

При случайном характере векторного сложения мощность результирующего сигнала будет равна сумме мощностей суммируемых процессов. Неза-

висимость параллельных информационных потоков обуславливает сложение дополнительных откликов как попарно независимых случайных величин. Поэтому второй момент результата сложения откликов параллельных каналов будет равен сумме вторых моментов этих откликов.

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 откликов будет определяться как сумма квадратов нормированных модулей откликов на данный образец образцов других сигналов группы. Таким образом, взаимное влияние сигналов в группе в суммарном исчислении определяется через нормированные взаимные корреляционные функции сигналов группы [3].

Результаты вычисления взаимного влияния, корреляции, вариантов, полученные для двух значений базы предлагаемого для использования в широкополосном канале связи сигнала, представлены в табл. 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 табл. 1 получены для кода порождающей последовательности равного 864 и при 10 разрядах регистра последовательности формирования неповторяющихся чисел при 1024 отсчетах сигнала. Они представляют максимальное, минимальное и среднее значения нормированной величины квадрата модуля взаимного отклика пары сигналов, определяемые для некоторого ограниченного ансамбля сигналов. Анализ табл. 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 вза-

имной 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.

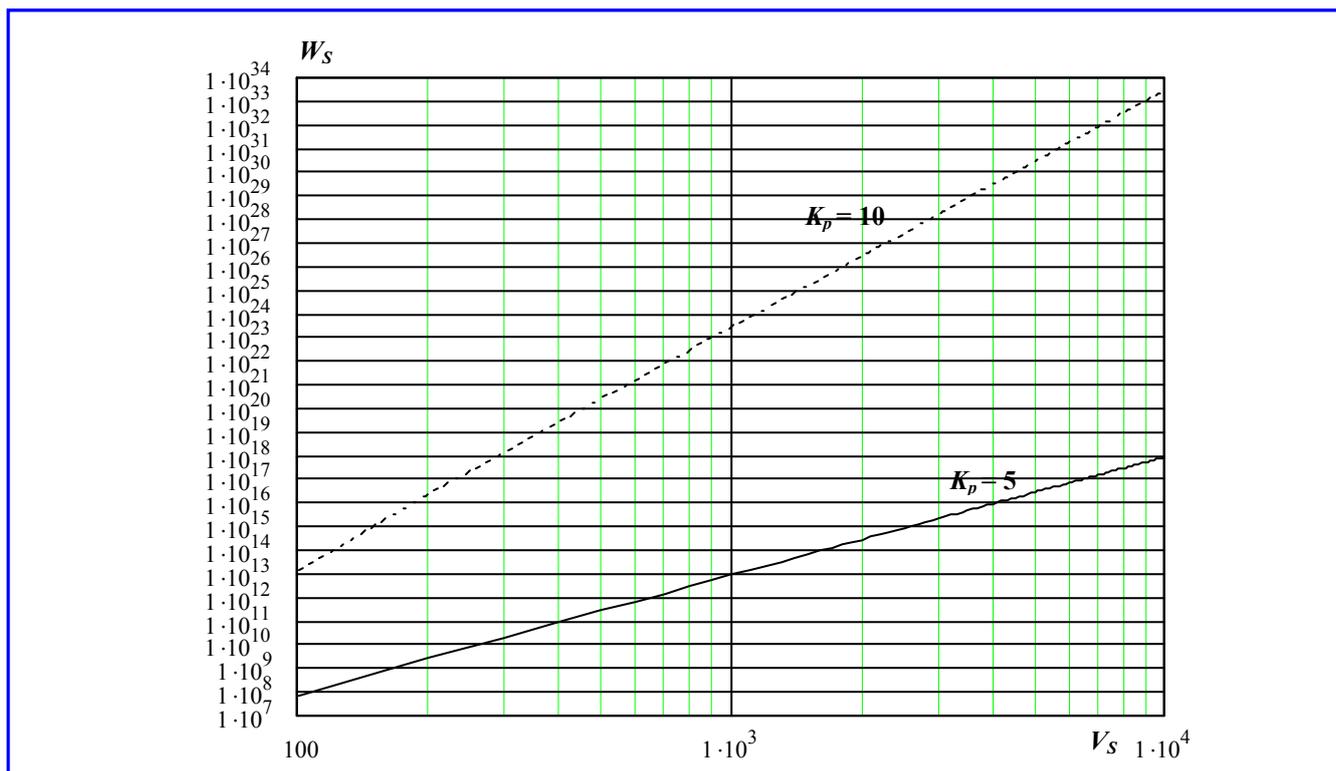
Полные ансамбли широкополосного сигнала с заданными значениями базы имеют очень большие объемы, и получение характеристик для полных ансамблей связано с очень большими затратами времени. Поэтому было выполнено исследование на ограниченных ансамблях. Полученные большие интервалы изменения исследуемой характеристики позволяют полагать, что использованные ограниченные ансамбли дают достаточно хорошее приближение к характеристикам полного ансамбля сигналов.

При реализации параллельных каналов с использованием ортогональных сигналов взаимное влияние каналов может быть ограничено на уровне ниже средних характеристик подбором вариантов сигнала с минимальным уровнем взаимной корреляции. 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 (размер ансамбля). Следовательно, необходимо выбрать варианты из объема вариантов, 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 и является очень большой величиной. На рисунке приведены графики зависимости (1) от объема ансамбля сигналов, построенные для двух значений размера группы K_p .

Результаты 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 $V_S = 1000$ имеет место 10^{13} вариантов при размере группы 5 и 10^{23} при размере 10. При объеме ансамбля $V_S = 10000$ (увеличение в 10 раз) число вариантов возрастает на 5 порядков для размера группы 5 и на 10 порядков при размере 10.



Зависимость числа вариантов W_s групп сигналов от размера ансамбля V_s

Задача поиска варианта группы сигналов с минимальным взаимным влиянием решалась на ограниченном объеме ансамбля сигналов. С использованием того же ансамбля, что и при определении характеристик, представленных в табл. 1. При этом реализовывался следующий алгоритм. На первом шаге вычислялась матрица значений взаимной корреляции пар сигналов ансамбля. Далее на основе этой матрицы последовательно определялись сигналы, которые удовлетворяли требованию к группе. Причем 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, реализовывался 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 табл. 2 представлены результаты формирования группы вариантов сигнала для двух значений базы и размера группы, полученные для разрядности регистра псевдослучайной последовательности (ПСП) равной 10 и кода коэффициентов 864. Здесь варианты группы задаются значениями начального состояния регистра ПСП.

Оценки, представленные в табл. 2, показывают, что рассмотренный алгоритм позволяет получать группы сигналов с относительно небольшим уровнем суммарного взаимного влияния. Для группы сигналов с минимальным взаимным влиянием уровень этого влияния 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 группы. 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 выбором условий формирования ансамбля сигналов. Однако на его основе можно получить ряд таких групп. Во-первых, можно варьировать число разрядов ПСП и её код, изменяя таким образом рассматриваемый ограниченный ансамбль сигналов.

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	$1,1 \cdot 10^{-3}$
–	–	–	–	365	$3 \cdot 10^{-4}$	88	$1,4 \cdot 10^{-3}$
–	–	–	–	377	$6 \cdot 10^{-4}$	89	$1,1 \cdot 10^{-3}$
–	–	–	–	430	$6 \cdot 10^{-4}$	129	$1,3 \cdot 10^{-3}$
–	–	–	–	448	$6 \cdot 10^{-4}$	171	$1,2 \cdot 10^{-3}$

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

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 табл. 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. Возможность получения ряда групп сигналов с низким уровнем взаимного влияния для одной ПСП следует из того, что, согласно данным табл. 3, вероятность относительно низкой взаимной корреляции сигналов достаточно велика.

Из данных табл. 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 двух

значений базы, отличающихся в 2 раза, полученные распределения по уровням достаточно близки.

Рассмотренные результаты получены для случая формирования широкополосного сигнала с использованием М-последовательности [1] для определения фазовой структуры вариантов сигнала. Однако сигнал с требуемыми свойствами может быть также получен на основе использования других способов формирования порождающих последовательностей. Поэтому область поиска групп сигналов с минимальным взаимным влиянием может быть расширена, что приведет к увеличению числа групп, которые могут быть использованы для передачи параллельных потоков информации в общей полосе частот с незначительным уровнем взаимного влияния потоков.

Таким образом, результаты предварительного исследования позволяют определять группы сигналов с низким уровнем взаимного влияния, содержащих достаточно большое число сигналов. В результате чего представляется возможным формирование достаточно большого числа таких групп путем последовательного накопления.

Для того, чтобы оценить воздействие взаимного влияния сигналов на ограничение выбора вариантов, целесообразно получить оценки качества передачи информации для границ интервала изменения этого влияния. Поэтому, кроме сочетаний вариантов сигналов, обеспечивающих минимальное взаимное влияние, необходимо определить сочетания, для которых характерен наиболее высокий уровень взаимного влияния [3]. Эта задача решалась аналогично задаче подбора вариантов с минимальным влиянием путем последовательного подбора по критерию максимума взаимной корреляции. При этом было установлено, что для используемого алгоритма формирования сигналов характерно дублирование сигналов.

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	$2,74 \cdot 10^{-2}$
–	–	–	–	454	$8,53 \cdot 10^{-3}$	208	$2,09 \cdot 10^{-2}$
–	–	–	–	477	$1,25 \cdot 10^{-2}$	247	$2,26 \cdot 10^{-2}$
–	–	–	–	505	$1,05 \cdot 10^{-2}$	248	$2,25 \cdot 10^{-2}$

Для получения неповторяющихся последовательностей необходимо ограничить интервал изменения начальных состояний величиной базы. Вопрос расширения вариантности сигнала может быть решен за счет применения других типов псевдослучайных бинарных последовательностей (например нелинейных) [3], а также иных алгоритмов преобразования.

Для решения задачи оценки воздействия взаимного влияния сигналов группы на качество передачи в интервале возможного изменения уровня этого влияния было проведено исследование для той же порождающей ПСП, а также определены сочетания вариантов с максимальным уровнем взаимного влияния. Полученные варианты представлены в табл. 4. Из сопоставления данных табл. 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. Вариации влияния в группе сигналов с максимальным взаимным влиянием существенно меньше, чем вариации влияния в группе с минимальным взаимным влиянием.

Исследованный параметр влияния в группе сигналов характеризует относительный уровень мощности составляющей отклика на образец сигнала, которая обусловлена взаимным влиянием сигналов в группе. Поэтому из полученных результатов

можно заключить, 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 вполне возможно.

Таким образом, предложенный метод формирования широкополосных, сложных сигналов, обеспечивающих адаптацию к условиям реального канала, позволяет получать большие ансамбли сигналов (размер ансамбля оценивается величиной факториала значения базы сигнала) с хорошими взаимно корреляционными свойствами. Поэтому в общей полосе частот можно размещать группу сигналов, которые оказывают незначительное взаимное влияние, что позволяет реализовать ортогональное уплотнение телеметрической информации, передаваемой по широкополосному каналу.

Литература

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

Поступила в редакцию 26.11.2010

Игорь Зенонович Климов, д-р техн. наук, профессор кафедры «Радиотехника», т. (3412) 59-25-10, e-mail: klimov@istu.ru.

Андрей Николаевич Копысов, канд. техн. наук, доцент, зав. кафедрой «Радиотехника», т. (3412) 59-25-10, e-mail: kan_kan@istu.ru.

Анатолий Михайлович Чувашов, канд. техн. наук, доцент кафедры «Радиотехника», т. (3412) 59-25-10.