**Развитие методов эффективного использования каналов связи**

...Если XVII столетие и начало XVIII столетия - век часов, то настоящее время есть век связи и управления.

Норберт Винер

Повышение эффективности использования канала связи достигается как путем применения разных методов уплотнения каналов связи, так и за счет сокращения избыточности сообщений.

Весьма актуальной проблемой электросвязи является вопрос об эффективном использовании каналов связи. Эта проблема возникла еще в XIX веке, и над ее решением работали многие инженеры и ученые. Одним из них был крупнейший американский изобретатель в области электросвязи Грей, который, по-видимому, первым предложил применение частотного уплотнения (ЧУ) проводных каналов связи, другим был французский инженер Бодо, изобретший метод временного уплотнения (ВУ). Эти методы позволяли по одному физическому каналу организовать передачу многоканальных сообщений. Они нашли широчайшее применение в технике электросвязи в XX столетии, в том числе в технике радиосвязи. При применении на передаче методов ЧУ или ВУ на приеме используются соответствующие методы разделения сигналов.

На начальном этапе развития радиосвязи при передаче аналоговых сигналов использовалось ЧУ. Временное уплотнение каналов для передачи телеграфных сигналов по радиоканалам начало применяться в 30-х годах, а для передачи аналоговых сигналов - в 40-х годах, когда стали создаваться радиорелейные системы с импульсными видами модуляции. В связи с внедрением цифровых систем связи в последние десятилетия XX века началось широкое применение многоканальных систем с ВУ, а также нового вида уплотнения каналов связи - кодового, основанного на использовании широкополосных сигналов с большой базой.

Сокращение избыточности передаваемых сообщений является другим методом, который позволяет повысить эффективность использования канала связи. Это особенно важно в современных системах, которые почти исключительно являются цифровыми.

Основными видами передаваемых сообщений до сего времени остаются звуковые и видеосигналы. Было установлено, что для качественной передачи этих сигналов в цифровом виде без применения методов сокращения избыточности сообщений требуются высокоскоростные системы. Скорость передачи сигналов в этих системах составляет: для речи - 64 Кбит/с, для звукового вещания - 350-600 Кбит/с, а для сигналов цветного ТВ - до 216 Мбит/с.

Для цифровых систем необходимая полоса частот канала связи увеличивается в десятки раз по сравнению с той, которая нужна для передачи звуковых и видеосигналов в аналоговом виде. С целью сокращения полосы частот, необходимой для создания цифровых систем связи, начиная с середины XX столетия выполняются многочисленные исследования и разработки, направленные на решение проблем сокращения избыточности сообщений.

**Уплотнение каналов радиосвязи**

Первые опыты по частотному уплотнению радиоканалов были осуществлены в США еще в 1914 году. После изобретения метода модуляции ОБП во многих странах велись разработки многоканальных радиосистем, использующих этот вид модуляции. В СССР первая такая работа была выполнена в 1935 году под руководством В. А. Котельникова. В этом же году в СССР была предложена система связи с многостанционным доступом и частотным разделением каналов (МДЧР), в которой отдельные каналы не закреплялись за абонентами. В этой системе абоненты имели возможность свободного доступа к отдельным частотным каналам, находящимся в пределах полосы частот, выделенной для работы многоканальной системы связи. Принцип свободного доступа существенно повышал эффективность использования этой полосы, и с 60-х годов XX столетия он начал широко использоваться в системах подвижной и спутниковой связи.

Советские ученые в 1941 году предложили применение метода ЧУ для создания многоканальных систем радиосвязи с ЧМ. Такие системы получили в XX веке широчайшее применение в радиорелейной связи.

С начала 60-х годов различные методы многостанционного доступа начинают применяться в системах спутниковой связи. Разрабатываются многоканальные системы "один канал на несущую - ОКН", в которых абоненты, используя ЧМ, имеют свободный доступ к любому из узкополосных частотных каналов системы. Позднее разрабатывается цифровая система SPADE, в которой на каждой несущей методом ОФМ-ИКМ передаются речевые сигналы. В этой системе предусмотрено выключение несущей в паузах речи, что позволяет увеличить число одновременно передаваемых через нелинейный спутниковый ретранслятор каналов до 800.

Создание спутниковых систем многостанционного доступа с временным разделением (МДВР) относится к 70-м годам. Эти системы весьма перспективны и также широко применяются в современной технике связи. В частности, они применяются в системах сотовой подвижной связи второго поколения, а также в радиорелейных линиях связи.

В 60-х годах в спутниковой связи начинают применяться системы многостанционного доступа с кодовым разделением (МДКР) каналов. В этих системах применяются широкополосные сигналы с большой базой, что позволяет многим абонентам, использующим такие сигналы с различной структурой, работать в общей полосе частот, не создавая друг другу ощутимых помех. Этот вид уплотнения оказался весьма эффективным, и в настоящее время он применяется в системах спутниковой и наземной, фиксированной и подвижной связи.

**Хронология**

|  |  |
| --- | --- |
| **1914 год**  | Опыты по частотному уплотнению радиоканала (США - Р. А. Хейсинг).  |
| **1918 год**  | Создание первой системы проводной связи с частотным уплотнением сигналами с ОБП (США).  |
| **1935 год**  | Создание в СССР однополосной многоканальной системы передачи сигналов телефонии и телеграфии (В. А. Котельников, А. В. Черенков, А. Ф. Ганин).  |
| **1935 год**  | Изобретение метода МДЧР (СССР - М. П. Долуханов).  |
| **1941 год**  | Изобретение многоканальной системы связи ЧУ-ЧМ (СССР - И. С. Гоноровский, В. И. Сифоров).  |
| **1964 год**  | Создание опытной спутниковой системы МДВР-ИКМ (США - фирма COMSAT).  |
| **1964 год**  | Создание спутниковой системы связи с МДКР-ИКМ (США - Г. Блэсбарг, Д. Фридман, Р. Киилер).  |
| **1969 год**  | Создание спутниковой системы "SPADE"-МДЧР-ИКМ (США - А. Вере).  |
| **1970 год**  | Создание спутниковой системы SMAX МДВР-ИКМ (Япония - С. Накамура, С. Кондо, Ю. Иноге).  |

**Сокращение избыточности при передаче звуковых сигналов**

Речевые сигналы

Речевые сигналы занимают полосу частот, равную примерно 3 кГц. Для их передачи с высоким качеством в цифровом виде с помощью ИКМ требуется канал связи со скоростью передачи 64 Кбит/с. Устранение избыточности речевых сигналов позволяет уменьшить эту скорость. Одним из методов сокращения избыточности сигналов речи является применение адаптивной ДИКМ. В этом методе осуществляется преобразование в цифровую форму разности между передаваемым отсчетом сообщения и его предсказанным значением по нескольким предыдущим отсчетам. Применение ДИКМ позволяет для речевых сигналов сократить необходимую скорость передачи в 2-4 раза.

Уменьшить избыточность сигналов речи можно и с помощью вокодерной техники. Первое изобретение вокодера, позволявшего сократить избыточность речевых сигналов, было сделано в 1939 году американским инженером Г. Дадли. В течение многих лет инженеры США, России, Франции, Японии и других стран работали над совершенствованием вокодеров.

В вокодерах путем анализа речевого сигнала голосовой тракт моделируется формирующим фильтром, возбуждаемым импульсным и шумовым сигналами. В процессе анализа определяются основные параметры речевого сигнала - параметры формирующего фильтра и частота основного тона речи, определяющая частоту импульсного воздействия. Эти параметры изменяются медленно, и для их передачи требуется скорость 4.8-16 Кбит/с.

Вокодеры широко применяются в современных системах подвижной связи. В системе сотовой подвижной связи стандарта GSM применяется вокодер с многоимпульсным возбуждением и линейным кодированием с предсказанием.

Над проблемами создания вокодерной техники активно работали многие советские ученые: А. П. Петерсон, А. С. Пирогов, М. А. Сапожков, Н. Н. Акинфиев, С. П. Баронин, В. Е. Муравьев, Ю. К. Трофимов, А. И. Куштуев и др. Современные методы компрессии речевых сигналов позволяют повысить эффективность использования канала связи в 15-30 раз. Вокодеры находят применение не только в системах подвижной и спутниковой связи, но и в устройствах запоминания речи, криптографии речевых сигналов, в устройствах автоматического распознавания речи и т. п.

Повысить приблизительно в 2 раза эффективность использования каналов связи в многоканальных системах, по которым передаются сигналы речи, возможно и более простыми методами, без применения в каждом канале вокодеров. Этого можно достичь, используя то обстоятельство, что каждый абонент занимает канал только 40% времени, в течение которого он говорит. Первой подобной системой, в которой паузы речи использовались для увеличения пропускной способности каналов связи, была аналоговая 48-канальная система TASI, созданная в 1957 году для подводной кабельной телефонной связи между Европой и Америкой.

В 1978 году в СССР был разработан цифровой аналог системы TASI, названный блочной ИКМ (БИКМ). В системе БИКМ сигнал каждого канала длительностью 2 мс методом ИКМ преобразуется в цифровую форму, и из всех отсчетов этого сигнала исключаются старшие разряды, имеющие значения логического нуля. Данный метод дает экономию в числе передаваемых по каналу связи битов за счет того, что в нем учитываются не только паузы между словами и слогами, как в системе TASI, но и распределение уровней речевых сигналов. Он нашел применение в цифровых многоканальных системах передачи сообщений по радиорелейным и спутниковым каналам связи. Применение БИКМ в цифровых системах связи со скоростью передачи 2048 Кбит/с удваивает их пропускную способность, позволяя передавать по ним не 30, а 60 ТФ каналов с высоким качеством, удовлетворяющим Рекомендациям МСЭ.

Сигналы звукового вещания

Сигнал звукового вещания занимает полосу частот порядка 15 кГц и имеет значительный динамический диапазон (75 дБ). Для качественной передачи такого сигнала по цифровым каналам связи необходимо применение 16-разрядной ИКМ. При этом скорость цифрового потока при преобразовании сигнала 3В вещания с помощью линейной ИКМ составляет 512 Кбит/с.

Для сокращения избыточности вещательных сигналов в современной технике применяется несколько методов. В 1980 году в компании Би-Би-Си была создана система NICAM (Near Instantaneous Companded) - система ИКМ с почти мгновенным компандированием для сокращения избыточности сигналов звукового вещания. Ее также называют системой ИКМ с масштабирующими множителями. Заложенные в ней принципы сокращения избыточности по существу мало отличаются от изобретенной несколько раньше системы БИКМ. Применение мгновенного компандирования сигнала и введение масштабных коэффициентов для блоков из последовательных 32 отсчетов позволяет уменьшить количество двоичных разрядов на один отсчет с 16 до 9.

Использование ДИКМ с введением масштабирования для блоков отсчетов также позволяет сократить количество двоичных разрядов на один отсчет до 9. При этом скорость цифрового потока при преобразовании монофонического сигнала 3В вещания уменьшается до 320 Кбит/с.

Значительным успехом в сокращении избыточности сигналов звукового вещания явилась разработка в 1989 году метода MUSICAM, включенного в стандарт MPEG (Moving Picture Expert Group), который предназначен для сокращения избыточности ТВ сигнала, включая сигнал звукового сопровождения. В системе MUSICAM вещательный сигнал разбивается на 32 парциальные полосы частот. Преобразование сигналов каждой полосы частот в цифровые потоки с помощью ИКМ осуществляется в соответствии с управляющими сигналами психоакустической модели восприятия человеком звуковых сигналов. При этом количество двоичных разрядов на один отсчет сокращается до 2. Система позволяет сократить скорость цифрового потока, необходимого для передачи сигналов моновещания, до 100 Кбит/с. В цифровом потоке со скоростью 256 Кбит/с возможна передача стереопрограммы с качеством компакт-диска.

Хронология

|  |  |
| --- | --- |
| **1939 год**  | Изобретение полосного вокодера (США - Г. Дадли).  |
| **1956 год**  | Создание формантного вокодера (США - Дж. Флаган, К. Говард).  |
| **1957 год**  | Создание гармонического вокодера (СССР - А. А. Пирогов). 1959 год - создание системы TASI (США - К. Булингтон и М. Фразер).  |
| **1962 год**  | Разработка корреляционных методов сжатия спектра речи (США - М. Шредер).  |
| **1978 год**  | Создание системы БИКМ (СССР - В. П. Кокошкин).  |
| **1980 год**  | Разработка системы NICAM для сокращения избыточности сигналов звукового вещания (Великобритания - К. Р. Каин и Ю. В. О'Кларей).  |
| **1988 год**  | Разработка высокоэффективной системы MUSICAM для сжатия сигнала звукового вещания.  |

Сокращение избыточности при передаче ТВ сигналов

Огромная работа во второй половине XX века была выполнена исследователями разных стран по разработке методов сжатия ТВ сигналов. Сокращение полосы частот таких сигналов обусловлено тем, что ТВ сигнал обладает большой избыточностью, так как имеются незначительные отличия двух последовательных кадров изображения и в каждом кадре имеются значительные однотонные участки. Эта избыточность приводит к особенностям спектра ТВ сигнала, которые могут быть использованы для сокращения полосы частот канала связи, требуемой для передачи ТВ сигнала. Такое сокращение возможно за счет использования статистических свойств изображения и психофизиологических особенностей визуального восприятия человека.

Первым исследованием, в котором было показано, что ТВ сигнал имеет значительную избыточность, так как основная энергия его спектра, имеющего линейчатую структуру, расположена на гармониках строчной и кадровой частоты, явилась работа, выполненная в 1934 году американскими инженерами П. Мертцом и Ф. Греем.

В 1950 году в США инженер Р. Дом предложил использовать частотное уплотнение спектра ТВ сигнала дополнительной информацией, передаваемой на поднесущей, частота которой выбиралась нечетно-кратной половине частоты строк, то есть она располагалась в середине между гармониками строчной частоты. Эти исследования в последующем были использованы при выборе частоты поднесущих для передачи сигналов цветности в спектре черно-белого ТВ сигнала. На этом принципе основаны все современные стандарты цветного ТВ (NTSC, PAL, SECAM).

В СССР первые исследования возможностей сокращения избыточности ТВ сигнала были проведены в конце 50-х годов Н. Г. Дерюгиным и Д. С. Лебедевым.

Одна из ранних идей использования линейчатого характера спектра ТВ сигнала состояла в том, чтобы в одном частотном канале передавать две ТВ программы, при этом спектр второго ТВ сигнала инвертировался и помещался в промежутки между частотными составляющими спектра первого ТВ сигнала. Разделение двух сигналов осуществлялось с помощью гребенчатых фильтров. Этот метод не нашел практического применения, но через тридцать лет на основе этих идей были созданы две современные аналоговые системы передачи ТВ сигналов высокой четкости (ТВЧ).

Одна из них была разработана в Японии (MUSA - Multiple Sub-Nyquist Sampling Encoding), а другая - во Франции (HD-MAC). Суть сжатия спектра в этих системах состоит в том, что частотные составляющие, лежащие в верхней области спектра исходного ТВ сигнала, помещаются в промежутки между частотными составляющими, находящимися в средней части исходного спектра. В системе MUSA достигалось сжатие спектра исходного ТВЧ сигнала в 3 раза (до 8.1 МГц), а в системе HD-MAC - в 1.5 раза (до 11 МГц). В обеих системах использовалась последовательная передача сигналов яркости, цветности, звукового сопровождения и сигналов синхронизации.

Будущее развитие систем передачи видеосигналов связано с применением цифровых методов их обработки, дающих сокращение скорости цифрового потока, необходимого для передачи этих сигналов с высоким качеством. В большинстве этих методов используется ДИКМ. При этом осуществляется предсказание каждого элемента изображения на основе взвешенной комбинации предыдущих отсчетов, расположенных вблизи от него. В канал связи передается разность между предсказанным и истинным значением этого элемента. Эта разность незначительна вследствие высокой корреляции соседних элементов изображения, и для ее передачи в цифровой форме необходимо значительно меньшее количество битов, нежели это требуется для преобразования в цифровую форму его исходных отсчетов. Применяется также и субнайквистовое кодирование, когда отсчеты по вертикальной, горизонтальной и временной оси изображения передаются с частотой, меньшей, чем 1/2W, где W - полоса частот изображения. На приеме восстановление недостающих элементов осуществляется путем интерполяции.

В стандартах MPEG для сжатия сигналов изображения учитывается также то, что большая часть изменений изображения от кадра к кадру является следствием смещений малых областей изображения в предыдущем кадре. Определив для каждой области это смещение (вектор движения), можно существенно повысить точность предсказания элементов изображения и, в итоге, сократить избыточность передаваемого сигнала.

Использование ДИКМ позволяет сократить цифровой поток для цветного ТВ сигнала до 50-70 Мбит/с. Применение адаптивной ДИКМ с использованием межполевого и межкадрового предсказания позволяет сократить этот поток до 30 Мбит/с.

Использование алгоритмов компенсации движения и кодирования блоков элементов изображения с помощью косинус-преобразования или преобразования Адамара дает возможность сократить цифровой поток вещательного ТВ сигнала до 6 Мбит/с.

Этот цифровой поток путем применения многопозиционных сигналов (например, КАМ-16) можно передать в полосе частот 1.5-2 МГц, что позволяет в полосе частот стандартного канала наземного ТВ вещания разместить 4-5 цифровых ТВ программ.

Хронология

|  |  |
| --- | --- |
| **1934 год**  | Установление тонкой структуры частотного спектра сигнала изображения (США - П. Мертц и Ф. Грей).  |
| **1950 год**  | Открытие метода частотной синхронизации, позволяющего уплотнить спектр ТВ сигнала путем передачи сигналов на поднесущих, частота которых выбирается равной нечетно-кратной половине частоты строк (США - Р. Дом).  |
| **1957 год**  | Экспериментальные исследования спектра мощности и функции корреляции ТВ сигнала (СССР - Н. Г. Дерюгин).  |
| **1958 год**  | Исследования возможностей применения статистического кодирования ТВ сигналов (СССР - Д. С. Лебедев).  |
| **1984 год**  | Разработка системы MUSE (Япония).  |
| **1986-1990 годы**  | Разработка методов сокращения цифрового потока для ТВ сигналов (Япония, Франция, США, СССР, Германия, Италия и др.).  |
| **1988 год**  | Разработка европейской системы HD-MAC.  |
| **1989 год**  | Завершение начатой в 1988 году разработки международной группой экспертов стандарта MPEG-1 для сжатия ТВ сигнала и стандарта для сжатия сигнала звукового сопровождения (MUSICAM).  |
| **1991 год**  | Разработка метода сокращения избыточности цифрового сигнала ТВЧ до 25 Мбит/с.  |
| **1994 год**  | Разработка и широкое внедрение в современную технику цифрового ТВ вещания стандарта MPEG-2 - усовершенствованной версии ранее разработанного стандарта MPEG-1.  |
| **1998 год**  | Разработка стандарта MPEG-4, дающего большее сжатие сигналов ТВ и звукового сопровождения, нежели стандарт MPEG-2.  |