Радиотелеметрическая система с цифровой обработкой экспоненциальных функций

Radio telemetry system with digital processing of exponential functions

Деев / Deev V.
Владимир Викторович
(vla.divdeev@mail.ru),
доктор технических наук, профессор.
ФГКВОУ «Военно-космическая академия
имени А. Ф. Можайского» МО РФ,
преподаватель кафедры технологий и средств
автоматизации обработки и анализа информации
космических средств.
г. Санкт-Петербург

Ключевые слова: многочастотная модуляция – multi-frequency modulation; многопозиционная модуляция – multi-position modulation; дискретное преобразование Фурье – discrete Fourier transform.

Рассмотрено цифровое формирование группового телеметрического радиосигнала с применением методов технологии LTE. Использованы частотно-временное уплотнение каналов и многочастотная, многопозиционная модуляция. В качестве примера использована структура кадра радиоинтерфейса системы поколения 4G.

The digital formation of a group telemetric radio signal using the method of LTE technology is considered. Frequency-time channel multiplexing and multi-frequency, multi-position modulation are used. As an example, the frame structure of the radio interface of a 4G generation system is used.

Цифровые технологии мобильной связи поколений 4G и 5G обеспечили повышение скорости передачи информации и уменьшение размеров пользовательских терминалов. Внедрение подобных технологий и цифровой обработки целесообразно использовать при создании новых радиотелеметрических систем.

В радиотелеметрических системах[1, 2] большое количество измеряемых параметров объединяются в единый поток, который формируется и передается в комплекс обработки. Передача данных от измерительных датчиков (группы датчиков) осуществляется в отдельных каналах. В каналах с частотным разделением данные преобразуются в сигналы с помощью модуляции гармонического поднесущего колебания. Канальные сигналы объединяются в групповой сигнал, который модуляцией несущего колебания преобразуется в линейный сигнал, передаваемый по радиолинии. Недостатком системы является использование значительной полосы частот при большом количестве телеметрических параметров. Применение многопозиционной и многочастотной модуляции с эффективным использованием выделенной полосы, реализованные в современных системах сотовой связи, позволит значительно увеличить скорость передачи телеметрической информации. Цифровая реализация канальных и группового сигналов с применением современной элементной базы существенно уменьшит габариты и увеличит надежность радиотелеметрической системы.

В качестве примера рассмотрим передачу группового телеметрического потока в кадрах сотовой связи стандарта 4G и 5G. Структура кадра показана на рис. 1.

Кадр имеет длительность 10 мс и делится на 20 слотов, нумеруемых от нулевого до 19-го, каждый из которых имеет длительность 0,5 мс. В пределах кадра различают подкадры, представляющие собой пару из двух смежных слотов: i-й подкадр содержит слоты с номерами $2i$ и $2i + 1$. Слот разделен на 7 интервалов, каждый из которых имеет длительность T_s=71,4 мс. На этом интервале используется множество из 2048 ортогональных гармонических колебаний (поднесущих колебаний) с разносом по частоте $1/T_s$.

В зависимости от качества каналов на различных частотах пользователям выделяются подмножества частот, ресурсные блоки. Если необходимо передавать данные с более высокой скоростью, то выделяется большее количество ресурсных блоков. Положение и параметры выделяемых пользователю ресурсов могут изменяться с течением времени.

Многочастотная модуляция с использованием множества таких гармонических сигналов получила название ортогональное частотное мультиплексирование OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing), а групповой сигнал на интервале T_s называют OFDM символом[5].

Технология OFDM позволяет мультиплексировать потоки данных, предназначенных различным

4 2020.indd 28 24.12.2020 16:48:22

абонентам, так как данные для различных пользователей можно размещать по разным поднесущим или группам поднесущих. Такой метод получил название множественного доступа с ортогональным частотным разделением OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access).

Выбираем режим работы с 10 OFDMA-символами в подкадре. В OFDM-символе будем использовать 72 поднесущих колебания. При таком выборе и использовании модуляции ФМ-2 в подкадре передается 720 бит данных. Если использовать один подкадр в каждом кадре, то скорость передачи данных будет равна 720/10 мс = 72000 бит/с =72 кбит/с. При выборе четырех подкадров скорость передачи данных увеличится до 288 кбит/с, что достаточно для передачи группового телеметрического потока 256 кбит/с. При переходе на использование КАМ-16 в одном подкадре передается 288 кбит/с. Освободившиеся три подкадра можно применить для передачи других потоков телеметрии. Можно передавать несколько потоков информативностью 512 кбит/с каждый и несколько потоков информативностью 1024 кбит/с, используя разные слоты и различные группы поднесущих частот. Потоки ТМИ можно перераспределять в пределах групповой скорости $V_г$=172 Мбит/с.

При квадратурной амплитудной модуляции (КАМ) блокам из n двоичных символов сопоставляются сигналы с разными значениями амплитуды и фазы [3,4]. Число возможных сигналов $M=2^n$. Блок двоичных символов разделяется на две части. Например, в один подблок входят символы на позициях с нечетными номерами, в другой подблок – символы на позициях с четными номерами. При аналоговой модуляции один подблок определяет амплитуду и полярность импульса x_{ck}, а другой подблок – амплитуду и полярность импульса x_{sk}. После умножения импульсов на $\cos 2\pi f_k t$ и $\sin 2\pi f_k t$ и суммирования квадратурных составляющих получается сигнал КАМ. Вид импульсов x_{sk} и результат умножения их на $\sin 2\pi f_k t$ для КАМ-16 показаны на рис. 2.

При цифровой обработке [6–7] числа x_{ck} и x_{sk} записываются комплексным числом

$$x_{ck} + j\, x_{sk}\,. \qquad (1)$$

Для примера обработаем фрагмент данных

1010 1100 0101

в сигнал с квадратурной амплитудной модуляцией КАМ-16.

Имеем подблоки на четных позициях

00 10 11 и значения x_{ck} –1 1 3, подблоки на нечетных позициях 11 10 00 и значения x_{sk} 3 1 –1. Фрагмент преобразуется в блок комплексных чисел:

$-1+j3,\ 1+j,\ 3-j1$, которые называются манипуляционными символами. Эти символы являются цифровым образом амплитуд сигналов при аналоговой многопозиционной модуляции. После перехода от последовательного потока к параллельному потоку манипуляционные символы используются в качестве коэффициентов в формуле обратного преобразования Фурье:

$$s(t) = \sum_{k=-N/2}^{N/2-1} X_k e \exp\left(\frac{jk2\pi t}{T_s}\right), \qquad (2)$$

где T_s – длительность сигнала. При дискретном обратном преобразовании Фурье:

$$S(n) = \sum_{k=-N/2}^{N/2-1} X_k \exp\left(\frac{j2\pi kn}{N}\right). \qquad (3)$$

Экспоненциальные функции являются цифровой моделью поднесущих колебаний, применяемых при аналоговой многочастотной модуляции.

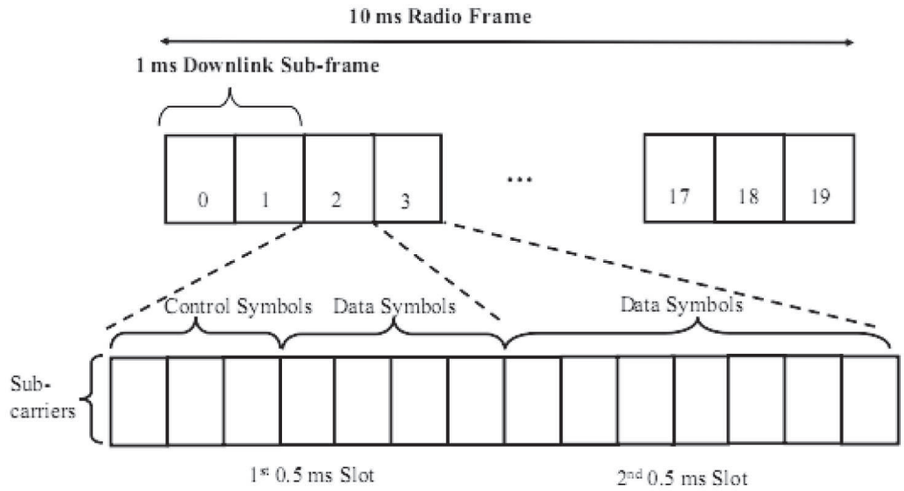

Рис. 1. Структура кадра

4 2020.indd 29 24.12.2020 16:48:22

Последовательность чисел(3) записывается в виде

$$S(n)=\sum_{k=-N/2}^{N/2-1}(x_{ck}+jx_{sk})\exp(\frac{j2\pi kn}{N})=$$
$$=\sum_{k=-N/2}^{N/2-1}[x_{ck}\cos(\frac{2\pi kn}{N})-x_{sk}\sin(\frac{2\pi kn}{N})]+$$
$$+j\sum_{k=-N/2}^{N/2-1}[x_{sk}\cos(\frac{2\pi kn}{N})+x_{ck}\sin(\frac{2\pi kn}{N})]. \quad (4)$$

Вещественная и мнимая составляющие сигнала разделяются, переводятся в аналоговую форму посредством цифро-аналогового преобразования и фильтров нижних частот. Преобразователи частоты в передающем устройстве осуществляют умножение вещественной составляющей (синфазный канал) на $\cos 2\pi f_0 t$, а мнимой составляющей (квадратурный канал) на $\sin 2\pi f_0 t$. После суммирования получается радиосигнал, спектр которого смещен на частоту f_0. Частота f_0 равна центру спектра компонентного сигнала.

На приемной стороне выполняется обратное преобразование. Умножением принятого сигнала $\cos 2\pi f_0 t$ и на $\sin 2\pi f_0 t$ производится выделение вещественной и мнимой составляющих с переносом их спектра на нулевую промежуточную частоту. Низкочастотные составляющие выделяются фильтром нижних частот. Далее производится аналого-цифровое преобразование (АЦП) и формирование последовательности комплексных чисел. Из последовательности этих чисел прямым дискретным преобразованием Фурье

$$X_k=\frac{1}{N}\sum_{n=0}^{N-1}S(n)\exp(-\frac{j2\pi kn}{N}). \quad (5)$$

получаются комплексные числа $X_k=x_{ck}+jx_{sk}$.

По значениям x_{ck} и x_{sk} восстанавливаются подблоки данных.

Рассмотренные особенности необходимо учитывать при анализе помехоустойчивости передачи данных и практической реализации метода.

Некоторые методы современных технологий мобильной связи могут быть использованы при создании более совершенных радиотелеметрических систем. В статье предложен вариант системы с применением в отдельных каналах квадратурной амплитудной модуляции поднесущих из множества ортогональных экспоненциальных комплексных функций. Приведены математические преобразования для реализации цифровой обработки на основе дискретного преобразования Фурье. Внедрение метода существенно увеличит скорость передачи измерительной информации, а использование современной элементной базы уменьшит размеры и повысит надежность аппаратуры.

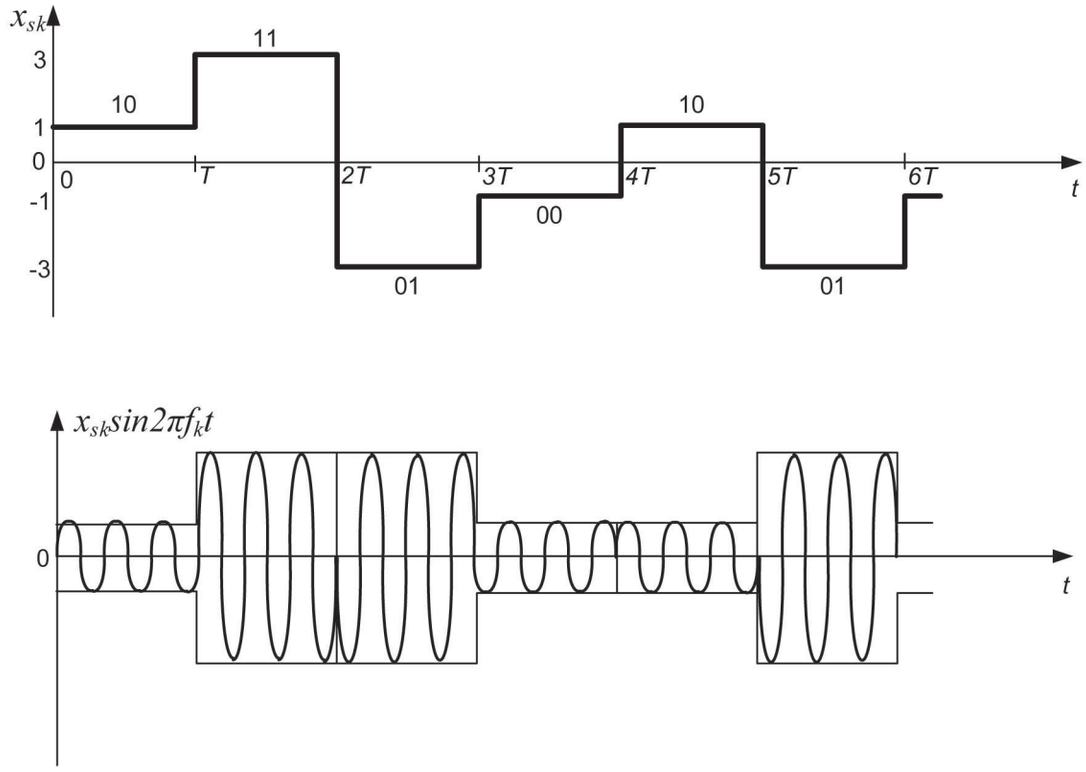

Рис. 2. Сигналы с квадратурной амплитудной

4 2020.indd 30 24.12.2020 16:48:23

Литература

1. Автоматизированная обработка телеметрической информации / В.А. Чикуров [и др.]. – СПб.: ВКА имени А.Ф. Можайского, 2014. – 473 с.

2. Деев, В. В. Формирование и передача телеметрической информации в современных системах / В.В. Деев, В.А. Чикуров. – СПб.: ВКА имени А.Ф. Можайского, 2013. – 89 с.

3. Деев, В. В. Методы модуляции и кодирования в современных системах связи / В.В. Деев. – СПб.: Наука, 2007. – 267 с.

4. Деев, В. В. Многопозиционная модуляция / В.В. Деев. – СПб.: ВАС, 2011.

5. Гельгор, А. Л. Технология LTE мобильной передачи данных: учеб. пособие / Гельгор А.Л., Попов Е.А. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2011. – 204 с.

6. Деев, В. В. Анализ возможностей технологии LTE в системах передачи и обработки телеметрической информации / В.В. Деев, Е.И. Копкин, В.В. Ткаченко // Труды Военно-Космической академии имени А.Ф. Можайского. – 2018. – № 664. – С. 121–130.

7. Тихвинский, В. О. Сети мобильной связи LTE/LTE Advanced / В.О. Тихвинский, С.В. Терентьев, В.П. Высочин. – М.: Медиа Паблишер, 2014. – 383 с.

4 2020.indd 31 24.12.2020 16:48:23