

УДК 621.396.946

## Способы цифрового формирования радиосигналов при передаче телеизмерений по каналам широкополосной спутниковой связи

### Methods of digital generation of radio signals during transmission of television measurements via broadband satellite communication channels

**Деев / Deev V.**

Владимир Викторович

(vka@mail.ru)

доктор технических наук, профессор,

действительный член МАИ.

ФГБВОУ ВО «Военно-космическая академия имени

А. Ф. Можайского» МО РФ,

преподаватель кафедры технологий и средств

автоматизации обработки и анализа информации.

г. Санкт-Петербург

**Ключевые слова:** технология SC-FDMA (Single Carrier – Frequency Division Multiple Access); технология SC-TDMA (Single Carrier – Time Division Multiple Access); многостанционный доступ – multi-station access; многопозиционная модуляция – multi-position modulation; дискретное преобразование Фурье – discrete Fourier transform.

В статье рассматриваются способы цифрового формирования радиосигналов SC-FDMA и SC-TDMA при передаче группового телеметрического сигнала по каналам широкополосной спутниковой связи. Используются частотный и временной многостанционный доступ, временное мультиплексирование данных и сигналы с многопозиционной модуляцией. При образовании сигналов применяются ортогональные экспоненциальные функции, прямое и обратное дискретное преобразование Фурье.

The article discusses the methods of digital generation of SC-FDMA and SC-TDMA radio signals when transmitting a group telemetry signal via broadband satellite communication channels. Frequency and time multi-station access, time multiplexing of data and time multi-position modulation are used. Orthogonal exponential functions, direct and inverse discrete Fourier transform are used in the formation of signals.

#### Введение

В настоящее время используются системы широкополосной спутниковой связи через малые космические аппараты на низких орбитах. Однако вопросы, связанные с описанием принципов многостанционного доступа и формирования сигналов, в публикациях не освещаются или приводятся в усеченных вариантах. В [1,2] на основании открытых источников информации сделан вывод, что в системе спутни-

ковой связи One Web применяются элементы технологии стандарта сотовой связи LTE. В [5,6] элементы технологии LTE применялись при формировании группового телеметрического сигнала (ГТС). В данной статье рассматривается передача ГТС по каналам спутниковой системы широкополосной связи.

Высокоскоростные данные передаются от станции сопряжения (СС) к абонентским терминалам (АТ) через ретрансляторы низкоорбитальных КА. В ретрансляторах выполняется только усиление и преобразование частоты сигнала. Сформированные на СС радиосигналы для различных абонентских терминалов передаются на КА в групповом тракте в определенной полосе частот. Радиосигналы от АТ к СС при ретрансляции через КА объединяются в групповой тракт и передаются на СС в другой полосе частот. При формировании фидерных линий между СС и КА используются антенны с узкой шириной диаграммы направленности.

#### Передача данных от абонентских терминалов к станции сопряжения

Увеличение пропускной способности и уменьшение габаритов абонентской аппаратуры достигается использованием на КА многолучевых антенн (МЛА), обладающих высоким коэффициентом усиления. При использовании таких антенн зона покрытия связью формируется путем территориального объединения зон покрытия отдельных лучей МЛА. Работа абонентских терминалов, находящихся в зоне покрытия различных лучей антенны, обеспечивается пространственным многостанционным доступом. В линии “вверх”, в которой передаются радиосигналы от АТ к КА, образуются частотные каналы с шириной полосы частот 20 МГц. Предположительно, в одном луче антенны организовано 6 таких каналов

с общей полосой пропускания шириной 120 МГц. В полосе 20 МГц абонентские терминалы передают радиосигналы на различных частотах: многостанционный доступ с частотным разделением работы АТ. Используется технология SC-FDMA (Single Carrier-Frequency Division Multiple Access – множественный доступ терминалов с частотным разделением их работы и передачей на одной несущей).

Применим элементы технологии LTE [3,4] в рассматриваемой широкополосной спутниковой системе связи. Абонентский терминал передает сигналы в кадрах длительностью 10 мс, которые подразделяются на более мелкие временные структуры: подкадры, слоты и субкадры. В кадре находятся 20 слотов, в подкадре – 2 слота. Субкадрами считаем 7 интервалов длительностью  $T_s=66,7$  мкс, на которые разделен слот. На этом интервале используется множество ортогональных поднесущих колебаний с разносом по частоте 15 КГц. Ортогональность обеспечивается выполнением соотношения:  $1/15 \text{ КГц}=66,7$  мкс. Такой ансамбль принято называть OFDM-символом. В слоте размещаются семь OFDM-символов. Применение таких ортогональных поднесущих колебаний обеспечивает экономное использование полосы частот.

Частотный ресурс задается в области от низких частот до максимальной частоты, равной ширине полосы частот. В сети LTE максимальная полоса частот канала равна 20 МГц. В этой полосе используется  $N_{\max}=1200$  частот, содержится 100 ресурсных блока по 12 поднесущих частот.

В системе One Web абонентскому терминалу выделяются все субкадры, в которых передаются полезные данные, служебные сигналы и различные запросы с временным мультиплексированием [1]. Применяемые абонентскими терминалами каналы различаются только несущей частотой, шириной полосы частот (соответственно, скоростью передачи данных) и распределением временного ресурса между служебными и информационными блоками.

В [5] технология SC-FDMA, известная из стандарта LTE, использовалась при формировании группового телеметрического сигнала (ГТС). В данной статье эта технология рассматривается при передаче ГТС по каналам спутниковой системы широкополосной связи.

ГТС, сформированный с использованием временного разделения каналов, представляет поток двоичных символов, размещенных в последовательности кадров. Для передачи ГТС по каналу спутниковой связи двоичные данные объединяются в пакеты, снабжаются адресной частью и подвергаются помехоустойчивому кодированию. Далее двоичные символы данных кадра поступают на модулятор, в котором в соответствии с выбранным видом модуляции преобразуются в модуляционные комплексные символы  $X_0, X_1, \dots, X_{M-1}$ , где  $M$  – число таких символов в кадре. Каждый модуляционный символ является комплексным числом:

$$X_n = x_{cn} + jx_{sn}, n=0,1,\dots,M-1, \quad (1)$$

вид которого зависит от метода модуляции.

Например, при КАМ-16 пары двоичных символов преобразуются в числа по правилу: 01 – -3, 00 – -1, 10 – 1, 11 – 3. Величина условной единицы определяется средней энергией сигнала. Это правило используется при формировании  $x_{cn}$  и  $x_{sn}$ .

При обработке фрагмента данных 1010 1100 0101, подблок символов на четных позициях 00 10 11 преобразуется в значения  $x_{cn}$ : -1 1 3, подблок на нечетных позициях 11 10 00 – в значения  $x_{sn}$ : 3 1 -1. Из фрагмента данных получается блок комплексных чисел:  $-1 + j3, 1 + j, 3 - j1$ .

Поток модуляционных символов разбивается на блоки  $X_0, X_1, \dots, X_{N-1}$ , каждый из которых будет размещаться в одном SC-FDMA символе. Количество модуляционных символов в блоке равняется количеству  $N$  поднесущих колебаний, выделенных каналу связи. В качестве поднесущих колебаний используются экспоненциальные ортонормированные функции [6]. Например, в системе мобильной связи стандарта 4G при использовании минимального частотного ресурса из 12 поднесущих колебаний  $N=12$ , а длительность SC-FDMA символа равна длительности OFDMA символа:  $T_{sc}=66,7$  мкс. Над группой комплексных чисел выполняется операция прямого дискретного преобразования Фурье:

$$A_k \sqrt{N} = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{n=0}^{N-1} (x_{cn} + jx_{sn}) \exp(-\frac{j2\pi kn}{N}), \quad k = -\frac{N}{2}, \dots, \frac{N}{2} - 1. \quad (2)$$

В результате получаем спектр из  $N$  комплексных амплитуд  $A_k \sqrt{N}$ , которые являются суммой составляющих расширенного спектра из-за дискретизации [1]. Эти числа умножаются на экспоненциальные функции с частотами в выделенной для связи полосе, средняя частота в которой  $\omega$ . Получаются  $N$  последовательностей чисел по  $n$  с разными значениями  $k$ . После этого выполняется операция обратного дискретного преобразования Фурье:

$$s(i) = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{k=-\frac{N}{2}}^{\frac{N}{2}-1} A_k \sqrt{N} \exp(j(\omega \Delta t i + \frac{2\pi ki}{N})) = \frac{1}{\sqrt{N}} \exp(j\omega \Delta t i) \sum_{k=-\frac{N}{2}}^{\frac{N}{2}-1} A_k \sqrt{N} \exp(\frac{j2\pi ki}{N}), 0 \leq i \leq N-1, \quad (3)$$

где  $\Delta t = T_{sc}/N$  шаг дискретизации на длительности SC-OFDM символа. Вводом дополнительных нулевых комплексных амплитуд значение  $N$  может быть увеличено. Например, это нужно для реализации быстрого

преобразования Фурье, так как  $N$  должна быть степенью числа 2. На интервале SC-OFDM символа получаются дискретные отсчеты сигнала. После цифро-аналогового преобразования и пропускания через полосовой фильтр получается SC-FDMA сигнал, состоящий из  $N$  элементарных сигналов с выбранной модуляцией. Смещение по частоте экспоненциальных функций вызывает независимое умножение модуляционных символов (1) на  $\exp(j\omega t)$  [5]. Каждый элементарный сигнал имеет вид:

$$\begin{aligned} s_n(t) &= (x_{cn} + jx_{sn})e^{j\omega t} = (x_{cn} \cos \omega t - x_{sn} \sin \omega t) + \\ &+ j(x_{sn} \cos \omega t + x_{cn} \sin \omega t) = \\ &= S_c(t) + jS_s(t), n=0,1,\dots,N-1. \end{aligned} \quad (4)$$

Формула (4) представляет операцию цифровой модуляции. Вещественная и мнимая части сигнала разделяются. Вещественная часть дает сигнал КАМ-М.

Для выполнения цифровой демодуляции сохраняются обе части сигнала (4). 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  $f_0$ :

$$u_s(t) = S_c(t) \cos 2\pi f_0 t + S_s(t) \sin 2\pi f_0 t \quad (5)$$

Частота  $f_0$  равна центру спектра компонентного сигнала.

Рассмотренное формирование сигнала позволяет использовать преимущество ортогонального частотного разнесения, которое заключается в эффективном использовании частотного ресурса. При этом защитный интервал между сигналами разных абонентов может быть опущен. Главное, осуществляется цифровая реализация модуляции с использованием известных методов дискретного преобразования Фурье. Возможен выбор различных методов модуляции, что позволяет адаптироваться к условиям распространения сигнала, к различным требованиям к качеству передачи данных.

В качестве примера выберем режим работы, при котором для передачи данных телеметрии выделено десять OFDM-символов в подкадре. В OFDM-символе будем использовать 72 поднесущих колебания: минимальный частотный ресурс, применяемый в стандарте 4G. При таком частотном ресурсе в одном OFDM-символе можно осуществить передачу 72 комплексных символов, при использовании модуляции ФМ-4 передаются 144 бит, а при КАМ-16 передаются 288 бит данных. При длительности кадра в спутниковом канале 10 мс и использовании в кадре десяти OFDM-символов скорость передачи данных имеет значение 144 Кбит/с (ФМ-4) и 288 Кбит/с (КАМ-16).

При передаче ГТС радиотелеметрической системы РТС-9, в которой используются кадры длительностью 10 мс (частота опроса измеряемого параметра 100 Гц), можно осуществить передачу потоков со скоростью 128 Кбит/с и 256 Кбит/с. Увеличить скорость передачи данных телеметрии можно, используя больший временной и частотный ресурсы.

Если в линии БС-АТ полоса частот позволит использовать 2048 поднесущих колебаний (при разносе частот 7,5 КГц и применении быстрых преобразований Фурье), при семи OFDM-символах во временном окне и 20 окнах на длительности кадра 10 мс, 140 OFDM-символах в кадре, и КАМ-64, скорость передачи данных будет 172 мбит/с:  $V_k = 2048 * 20 * 7 * 6 * 10^2 = 172$  Мбит/с.

В случае быстроменяющихся параметров последовательный поток данных можно распараллелить, разделить на множество низкоскоростных потоков и передать на разных частотах. Используя частотный многостанционный доступ, можно осуществить передачу телеизмерений с пунктов, разнесенных в пространстве.

### Передача данных от станции сопряжения к абонентским терминалам

В линии “вниз” передаются радиосигналы, поступающие на КА от станции сопряжения, и после обработки в ретрансляторе направляемые к АТ, находящимся в его зоне обслуживания. Образованы частотные каналы с полосой частот 250 МГц. Эти каналы распределяются по лучам бортовых антенн.

В частотном канале луча антенны используется передача данных на одной несущей частоте с временным разделением каналов к различным абонентским терминалам: многостанционный доступ с временным разделением каналов. Используется технология SC-TDMA (Single Carrier Time Division Multiplexing Access). Активным абонентам сети назначаются короткие временные интервалы, которые распределены по 20 слотам. Формирование радиосигналов для различных абонентских терминалов, распределение их по частотным каналам лучей антенны КА и размещение по временным интервалам слотов, выделяемым АТ, выполняется в СС.

Рассмотрим применение технологии LTE. Если используется 1152 ресурсных блоков [1] по 12 частот, количество частот  $1152 * 12 = 13824$ . При разносе частот 15 КГц полоса частот равна  $13824 * 15$  КГц = 207306 КГц, что соответствует полосе частот 250 МГц. При быстром преобразовании Фурье можно использовать режим 6К = 16384,  $16384 * 15$  КГц = 245760 КГц = 245,76 МГц.

Скорость передачи данных в канале к абонентскому терминалу зависит от количества выделенных временных интервалов в кадре. В [1] представлен пример варианта формирования структуры субкадров по линии “вниз” с использованием всей полосы частот шириной 250 МГц.

Рассмотрим передачу высокоскоростного потока данных группового телеметрического сигнала по линии от станции сопряжения к абонентскому терминалу. Для передачи ГТС по каналу спутниковой связи двоичные символы преобразуются в радиосигналы с определенным видом модуляции. Применим рассмотренную выше технологию SC, обеспечивающую цифровую реализацию операции модуляции [5]. Из двоичных символов ГТС формируются комплексные числа манипуляционных символов, вид которых зависит от метода модуляции. Поток комплексных символов разбивается на блоки по  $M_{sc}$  символов. Число  $M_{sc}$  равняется количеству частот в выделенном АТ частотном ресурсе. Можно использовать все 13824 частоты. Каждый блок будем передавать на интервале времени, который равен длительности OFDM-символа. Над блоком из  $M_{sc}$  комплексных чисел производится операция прямого дискретного преобразования Фурье. Получаются комплексные амплитуды спектра последовательности комплексных чисел (2). Количество комплексных амплитуд соответствует объему выделенного абонентскому терминалу ресурса в канале:  $N=M_{sc}$ .

Комплексные амплитуды последовательно умножаются на ортогональные несущие колебания (экспоненциальные ортонормированные функции) выделенного частотного ресурса. Выполняется обратное дискретное преобразование Фурье (3). Из полученных чисел цифро-аналоговым преобразованием формируется последовательность из  $M_{sc}$  элементов радиосигнала с выбранным методом модуляции [5].

При использовании 13824 частот и модуляции ФМ-4 и одного OFDM-символа в кадре скорость передачи двоичных символов равна 2,8 Мбит/с.

При использовании КАМ-64 и 140 OFDM-символов в кадре получается максимальная скорость передачи двоичных символов, которая равна 1176 Мбит/с.

В статье [7] выполнена оценка помехоустойчивости приема сигналов КАМ-М и использовании OFDM-символов. Вероятность ошибки при демодуляции зависит от минимального расстояния по Евклиду между сигналами. В [5] показано, что данные расстояния при OFDM и SC-FDMA равны, поэтому зависимости помехоустойчивости, полученные в [7], справедливы и для сигналов SC-FDMA. Выигрыш от сигналов SC-FDMA получается только от лучшего использования мощности передатчика. Поскольку принцип формирования сигналов SC-FDMA и SC-TDMA одинаковый, результаты в [7] применимы для сигналов SC-TDMA.

## Заключение

В данной статье рассмотрены способы многостанционного доступа, используемые в системе широкополосной спутниковой связи One Web. Формирование радиосигналов выполнено с применением технологий

SC-FDMA и SC-TDMA. Данные технологии используют цифровую обработку на основе прямого и обратного дискретного преобразования Фурье. Внедрение методов позволит заменить аналоговое построение аппаратуры цифровой, программной реализацией, повысить энергетическую и частотную эффективность РТС, существенно увеличить скорость передачи измерительной информации, а использование современной элементной базы уменьшит размеры и повысит надежность аппаратуры.

## Литература

1. Чепурнов, П. А. Обобщенный алгоритм функционирования абонентского терминала в сети низкоорбитальной системы широкополосной спутниковой связи OneWeb / П.А. Чепурнов, А.С. Шестковой, А.В. Жуковский // Информация и Космос. – 2021. – № 2. – С. 45–55.
2. Чепурнов, П. А. Общая описательная модель низкоорбитальной многоспутниковой системы широкополосной OneWeb / П.А. Чепурнов, Р.С. Яковлев, А.Н. Мищуков // Информация и Космос. – 2022. – № 3. – С. 46–56.
3. Тихвинский, В. О. Сети мобильной связи LTE/LTE Advanced / В.О. Тихвинский, С.В. Терентьев, С.В. Высочин. – Москва : Медиа Паблишер, 2014. – 384с.
4. Гельгор, А. Л. Технологии LTE мобильной передачи данных / А.Л. Гельгор, Е.А. Попов. – Санкт-Петербург : Изд-во гос. политехнического университета, 2010. – 205 с.
5. Деев, В. В. Цифровое формирование группового телеметрического сигнала с КАМ и передачей на одной несущей / В.В. Деев // Информация и Космос. – 2022. – № 3. – С. 20–22.
6. Деев, В. В. Радиотелеметрическая система с цифровой обработкой экспоненциальных функций / В.В. Деев // Информация и Космос. – 2020. – № 4. – С. 28–31.
7. Деев, В. В. Помехоустойчивость цифровой демодуляции многочастотного сигнала с КАМ экспоненциальных ортонормированных функций при приеме группового телеметрического сигнала / В.В. Деев // Информация и Космос. – 2021. – № 3. – С.14–18.