

УДК 621.391

## ФОРМИРОВАНИЕ СИГНАЛОВ СИНХРОНИЗАЦИИ МНОГОЧАСТОТНЫХ СИГНАЛОВ OFDM

БАНКЕТ В.Л., ПЕРСИН А.Д.

Одесская национальная академия связи им. А.С. Попова

## THE SYNCHRONIZATION SIGNALS FORMING OF MULTIFREQUENCY OFDM SIGNALS

V.L. BANKET, A.D. PERSIN

Odessa National Academy of Telecommunications n.a. A.S. Popov

**Аннотация.** В статье разработан новый способ формирования сигналов синхронизации многочастотных сигналов OFDM, предназначенный для оценки моментов начала и окончания сигналов. Моделирование подтвердило работоспособность предложенного способа.

**Abstract.** The new way of the synchronization signals formation for multifrequency signals OFDM is developed. The way intended for an estimation of the beginning & termination time moments of signals. Simulation has confirmed working capacity of the offered algorithms.

### ВВЕДЕНИЕ

Многочастотные сигналы ортогонального частотного мультиплексирования OFDM широко используются в современных телекоммуникационных системах для передачи информации как по каналам с частотно-селективными замираниями [1...8], так и по каналам с ненормированными характеристиками [9]. Отличительная особенность обработки таких сигналов – использование при демодуляции процедур интегрирования в пределах посылок на каждой из поднесущих, составляющих многочастотный сигнал. Моменты начала и окончания операций интегрирования обычно задаются сигналами синхронизации. Поэтому разработка способов формирования сигналов синхронизации многочастотных сигналов OFDM является *важной и актуальной* задачей. Вместе с тем, несмотря на наличие ряда действующих систем с сигналами OFDM (например, WiMAX, Wi-Fi, LTE[7], DVB-T, DSL[9] и др.), в литературе сведений о способах выделения сигналов синхронизации крайне мало. В специализированной западной монографии по методам OFDM[7], этот вопрос не рассматривается вообще. В отечественной монографии [9] в разделе «6.2.2.Алгоритм тактовой синхронизации» обсуждаются особенности применения метода синхронизации с использованием специального канала синхронизации, для организации которого требуются дополнительные затраты мощности сигнала и полосы частот. К этому следует добавить, что многолетняя практика развития систем передачи с одночастотными сигналами приводила разработчиков аппаратуры к использованию простых и эффективных методов выделения сигналов синхронизации *непосредственно из принимаемого сигнала*, не требующих дополнительных затрат мощности и полосы частот. Предварительные исследования показывают, что и в случае OFDM подобный способ синхронизации может быть предложен. *Задача настоящей статьи* – разработка способа формирования сигналов синхронизации многочастотных сигналов OFDM, основанного на использовании свойств ортогональности этих сигналов. Изложение способа формирования сигналов синхронизации сопровождается необходимыми математическими выкладками, а также временными диаграммами, полученными моделированием процессов с использованием возможностей программного комплекса HPVEE.

### 1 МНОГОЧАСТОТНЫЕ СИГНАЛЫ OFDM

В широко распространенном варианте реализации многочастотных сигналов используют ортогональные гармонические переносчики длительности  $T$ , выбираемых из набора тригонометрических функций объема  $N$  [9]:

$$\left\{ \cos i\omega_0 t \right\}_{i=0}^{i=N-1}, \quad 0 < t < T. \quad (1)$$

При выполнении условия

$$\omega_0 = \frac{2\pi}{T} \quad (2)$$

пара любых функций из набора (1) ортогональна на интервале (0..T):

$$\int_0^T \cos l\omega_0 t \cos m\omega_0 t dt = 0, \quad l \neq m \quad l, m = 1, 2, \dots, N. \quad (3)$$

В выражениях(1...3)  $\omega_0$  –интервал между частотами соседних поднесущих в наборе (1).

При использовании амплитудной модуляции поднесущих (1) модулирующими информационными символами  $a_i, i=[0...(N-1)]$  передаваемый в канал OFDM сигнал имеет вид ( $S_0$ – амплитуда немодулированной поднесущей

$$S_{OFDM}(i, t) = \sum_{i=0}^{N-1} S_0 a_i \cos(i\omega_0 t). \quad (4)$$

Отметим, что слагаемые сигнала (3) размещены в интервале (0..T), который и является интервалом существования всего сигнала  $S_{OFDM}(i, t)$ .

## 2 ПРОХОЖДЕНИЕ СИГНАЛА ЧЕРЕЗ КВАДРАТОР/ИНТЕГРАТОР

Для определения оценок начала и окончания интервала существования сигнала  $S_{OFDM}(i, t)$  подадим многочастотный сигнал (4) на квадратор (устройство возведения в квадрат). Для корректного вычисления результатов квадратичной обработки определим многочастотные сигналы, подобные (4), но с иной нумерацией слагаемых

$$S_{OFDM}(l, t) = \sum_{l=0}^{N-1} S_0 a_l \cos(l\omega_0 t), \quad S_{OFDM}(m, t) = \sum_{m=0}^{N-1} S_0 a_m \cos(m\omega_0 t). \quad (5)$$

При такой записи результат возведения в квадрат сигнала (4) определится как произведение сигналов вида (5)

$$V(l, m, N) = \left\{ \sum_{l=0}^{N-1} S_0 a_l \cos(l\omega_0 t) \right\} \times \left\{ \sum_{m=0}^{N-1} S_0 a_m \cos(m\omega_0 t) \right\}. \quad (6)$$

При переборе индексов в произведении (6) результат может быть представлен в виде таких сумм

$$\left[ S_{OFDM}(l, m, t) \right]^2 = V(l, m = l, t) + V(l, m \neq l, t). \quad (7)$$

В произведении (6) встречаются сомножители с одинаковыми индексами (т.е. поднесущие сигнала OFDM с совпадающими частотами). Таких компонентов будет всего  $N$ . Они имеют вид:

$$V(l, m = l, t) = \sum_{l=0}^{N-1} S_0^2 a_l^2 \cos^2(l\omega_0 t) = \sum_{l=0}^{N-1} \frac{S_0^2 a_l^2}{2} (1 + \cos 2l\omega_0 t). \quad (8)$$

Кроме того, в полном множестве вариантов индексов частот (всего  $N^2$  вариантов) будет  $(N^2 - N)$  произведений компонентов с различными индексами ( $m \neq l$ ) (поднесущих с несовпадающими частотами) вида

$$V(l, m \neq l, t) = \sum_{l=0}^{N-1} \sum_{m=0; m \neq l}^{N-1} S_0^2 a_l a_m \cos(l\omega_0 t) \cos(m\omega_0 t). \quad (9)$$

Далее следует воспользоваться свойством ортогональности (3) поднесущих, составляющих многочастотный сигнал OFDM. Из вида формулы (3) следует, что свойство ортогональности «проявляется» в пределах интервала интегрирования (0...T). Подадим результат возведения в квадрат (7) на интегратор (накопитель). Если процесс обработки сигнала начинается с момента  $t = 0$  и продолжается достаточно долго ( $t > 0$ ), то на всем интервале наблюдения выхода интегратора всегда найдётся «интервал ортогональности» (0...T), в пределах которого свойство ортогональности может быть исполь-

зовано для решения задачи определения оценок начала и окончания интервала существования сигнала  $S_{OFDM}(i, t)$ .

В частности, интегрирование комбинационных составляющих с разными частотами в (9) с учетом свойства ортогональности (3) дает результат

$$I(m \neq l) = \int_0^T \left\{ \sum_{l=0}^{N-1} \sum_{m=0, m \neq l}^{N-1} S_0^2 a_l a_m \cos(l\omega_0 t) \cos(m\omega_0 t) \right\} dt = 0 \quad (10)$$

Иными словами, выход интегратора не содержит комбинационных составляющих от взаимодействия в квадраторе колебаний сигналов поднесущих разных частот. В то же время, выход интегратора содержит полезный сигнал, пригодный для формирования требуемых оценок времени начала и окончания сигнала. В частности, интегрирование результатов прохождения через квадратор поднесущих с равными частотами (8) дает

$$I(m = l, N, T) = \int_0^T \left[ \sum_{l=0}^{N-1} \frac{S_0^2 a_l^2}{2} (1 + \cos 2l\omega_0 t) \right] dt = \frac{S_0^2 a_l^2 NT}{2}. \quad (11)$$

Полученный результат есть полная энергия многочастотного OFDM сигнала  $E_{OFDM} = \frac{S_0^2 a_l^2 NT}{2}$ , равная сумме  $N$  одинаковых частных энергий поднесущих.

Можно говорить о том, что устройство «квадратор/интегратор» при обработке OFDM сигнала реализует функции некоего «коллективного» (группового) коррелятора, *вычисляющего и объединяющего* коэффициенты корреляции сигналов поднесущих, входящих в состав многочастотного сигнала.

### 3 ВЫДЕЛЕНИЕ ГРАНИЦ OFDM СИГНАЛА

Типовая форма выхода квадратора при обработке сигнала OFDM, принимаемого на фоне флуктуационного шума канала показана на рис.1. Выход квадратора (11) содержит постоянную составляющую  $\frac{S_0^2 a_l^2}{2}$ . В целом, результат возведения в квадрат есть прямоугольный импульс с флуктуирующей вершиной. Границы этого сигнала можно определить, выполнив амплитудное ограничение, которое подавляет амплитудные флуктуации, но при этом будут утрачены отмеченные выше ортогональные свойства поднесущих и фильтрующие свойства интегратора.

Вместе с тем, отмеченные свойства могут быть эффективно использованы для выделения границ сигнала. Обратимся к рис. 2, на котором показаны результаты интегральной обработки выхода квадратора (верхняя кривая (пунктир) «Интегратор»). Нижней кривой (сплошная «С+Ш») представлен обрабатываемый сигнала OFDM с шумом. Поступление на вход интегратора многочастотного сигнала с энергией (11) изменяет наклон кривой результата накопления. Видно, что положение границ сигнала может быть определено по изменению величины производной результата накопления (точнее, по изменению знака второй производной: положительный скачок второй производной соответствует началу сигнала и отрицательный скачок второй производной совпадает с моментом окончания анализируемого сигнала).

Таким образом, *алгоритм выделения границ OFDM сигнала* заключается в следующем:

1 *Нелинейная обработка* многочастотного сигнала (возведение в квадрат) в квадраторе для получения комбинационных продуктов (произведений) колебаний поднесущих с совпадающими и несовпадающими частотами.

2 *Линейная обработка* в интеграторе комбинационных продуктов с выхода квадратора, в результате чего с использованием свойств ортогональности составляющих OFDM сигнала (поднесущих) удаётся, в последующем, выявить границы анализируемого сигнала.

3 *Выделение методом вычисления второй производной* результатов линейной обработки *границ начала и окончания* многочастотного OFDM сигнала.

Описанный выше алгоритм был промоделирован. Результаты моделирования даны на рис. 3.

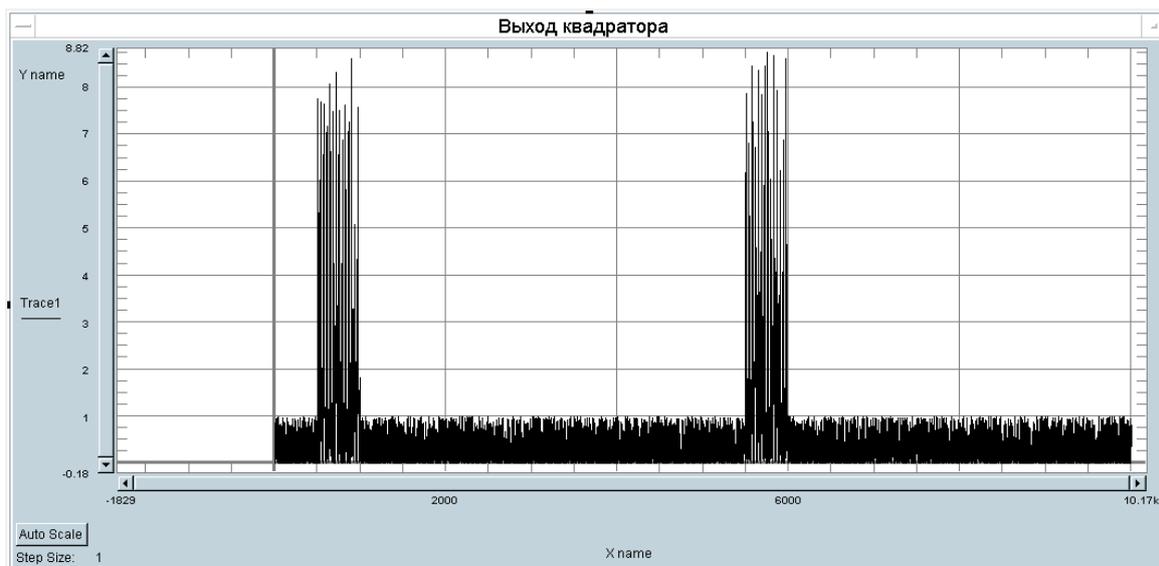


Рисунок 1 – Форма сигнала на выходе квадратора при действии на его входе суммы OFDM и флуктуационного шума

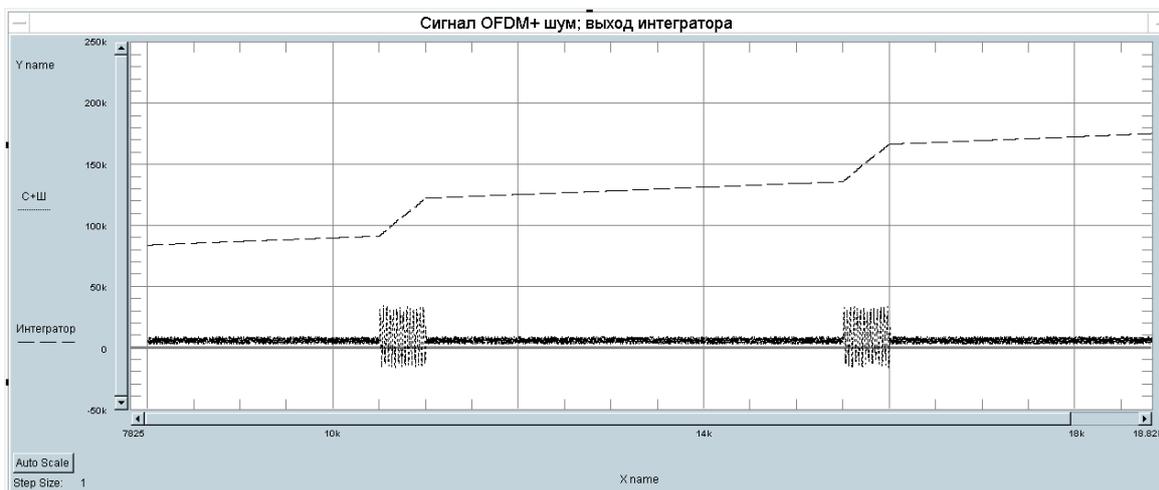


Рисунок 2 – Результат прохождения через квадратор/интегратор суммы многочастотного сигнала и шума канала

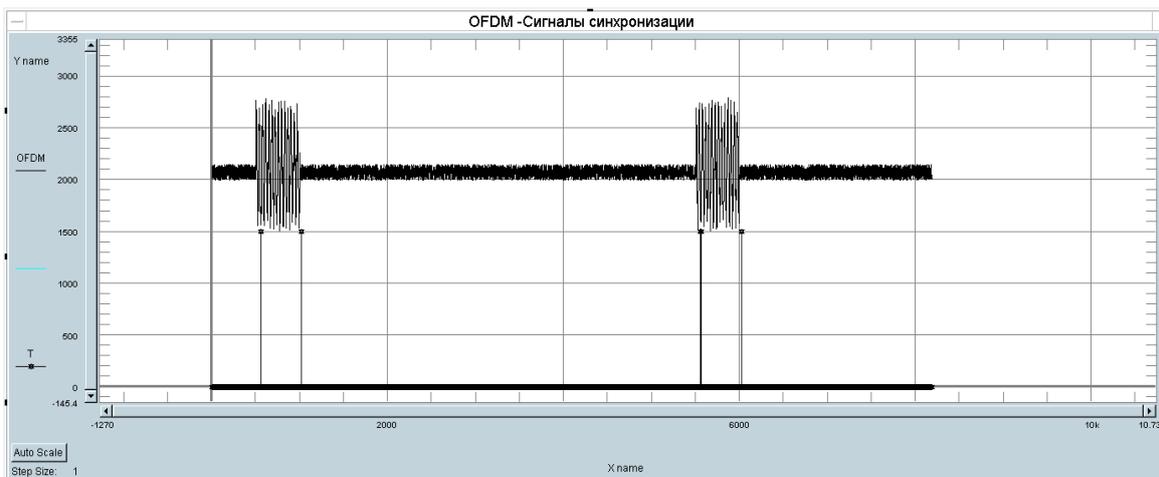


Рисунок 3 – Результат выделения границ многочастотного OFDM сигнала, принимаемого на фоне аддитивного шума. Нижней кривой отмечены моменты начала и окончания сигнала

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Уникальные свойства составляющих многочастотного сигнала (ортогональность поднесущих) использованы для разработки нового способа формирования сигнала синхронизации многочастотных сигналов OFDM.

2. Предложенный алгоритм формирования оценок моментов начала и окончания сигнала включает последовательное применение простых в реализации процедур нелинейной и линейной обработки сигнала.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Bahai A.R.S. Multi-Carrier Digital Communications. Theory and Applications of OFDM. Second Edition / Bahai A.R.S., Saltzberg B.R., Ergen M. – Boston: Springer Science + Business Media, Inc., 2004. – 411 с.

2. Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение. Второе издание, исправленное / Скляр Б. ; пер. с англ. – Москва: Издательский дом "Вильямс", 2003. – 1104 с.

3. Lampe L. Differential Modulation Diversity for OFDM / Lampe L., Schober R. // 6th International OFDM-Workshop (InOWo). – Hamburg, 2001. – С. 19-1–19-6

4. Fischer R. Coded Modulation for Noncoherent Reception with Application to OFDM / R. Fischer, L. Lampe, S. Muller-Weinfurtner // IEEE Transactions On Vehicular Technology, Vol. 50, No. 4, July, 2001. – P. 910–919

5. Sommer D. Aspects of Coding and Modulation for OFDM / D. Sommer, G. P. Fettweis // 6<sup>th</sup> International OFDM-Workshop (InOWo). – Hamburg, 2001. – с. 21-1–21-4

6. Sampath H. A Fourth-Generation MIMO-OFDM Broadband Wireless System: Design, Performance, and Field Trial Results // Hemanth Sampath, Shilpa Talwar, Jose Tellado, Vinco Erceg // IEEE Communications Magazine (September, 2002). – P. 143–149

7. Вишнеvский В.М. Энциклопедия WiMAX Путь к 4G / Вишнеvский В.М., Портной С.Л., Шахнович И.В. – М.: Техносфера, 2009. – 472 с.

8. Банкет В.Л. Сигнально-кодовые конструкции в телекоммуникационных системах / В.Л. Банкет; – Одесса: Феникс, 2009. – 180 с.

9. Балашов В.А. Системы передачи ортогональными гармоническими сигналами / В.А. Балашов, П.П. Воробиенко, Л.М. Ляховецкий. – М.: Эко-Трендз, 2012. – 228 с.