

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) ω_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.

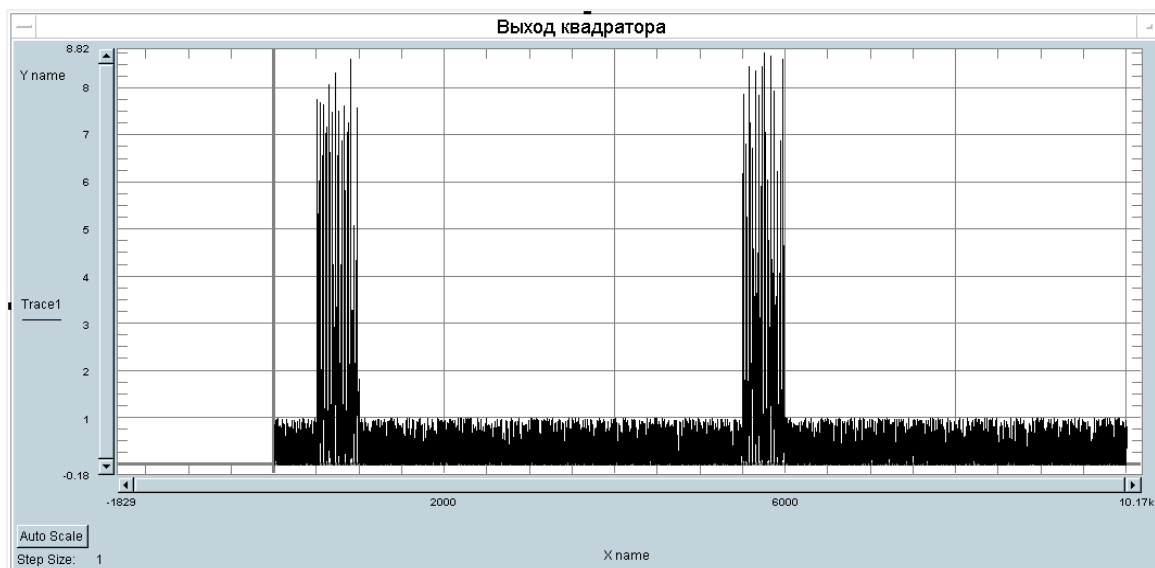


Рисунок 1 – Форма сигнала на выходе квадратора при действии на его входе суммы OFDM и флуктуационного шума

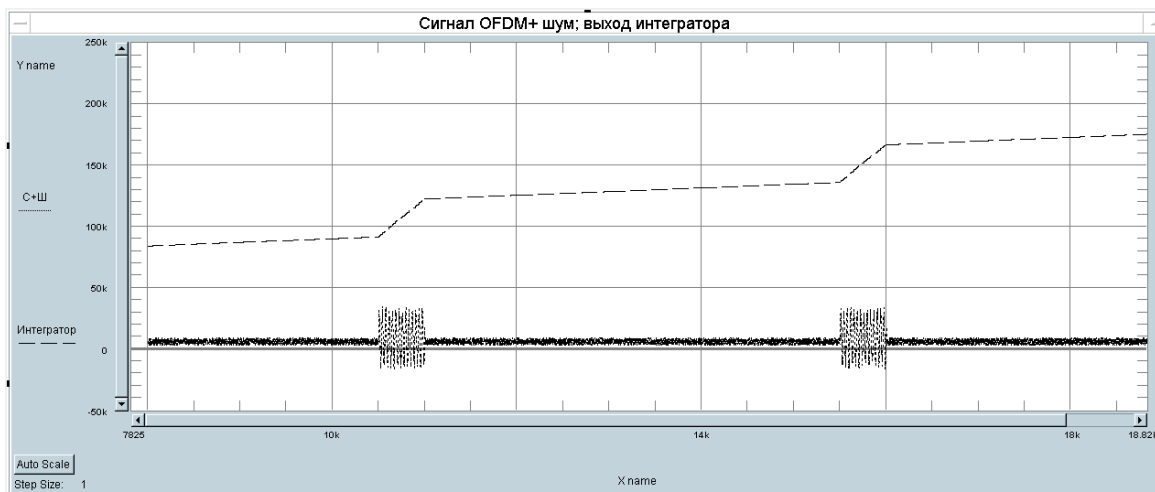


Рисунок 2 – Результат прохождения через квадратор/интегратор суммы многочастотного сигнала и шума канала

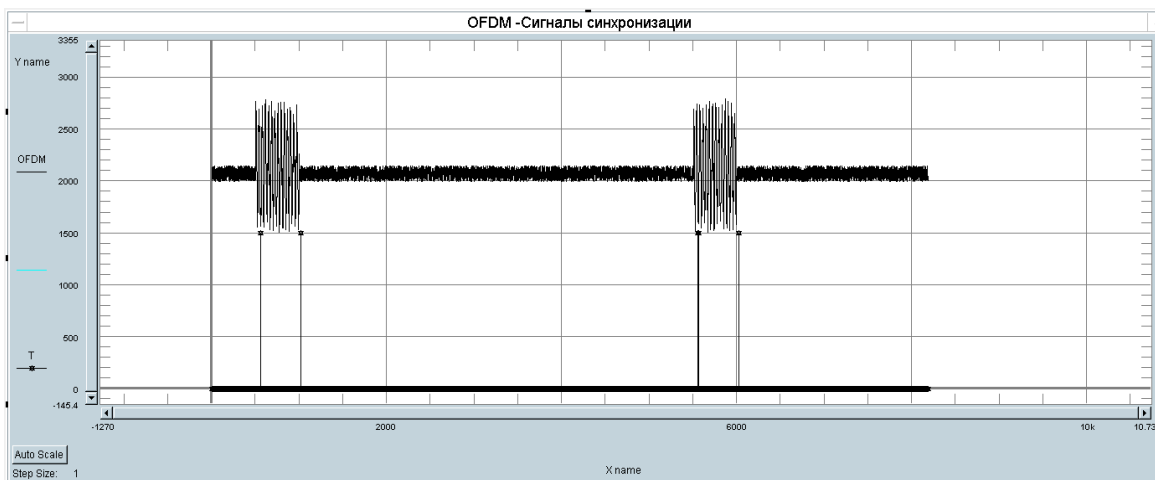


Рисунок 3 – Результат выделения границ многочастотного OFDM сигнала, принимаемого на фоне аддитивного шума. Нижней кривой отмечены моменты начала и окончания сигнала

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 // 6th 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.