

УДК 621.396.93.037.372

РАСЧЕТ ВРЕМЕНИ ВХОЖДЕНИЯ В СИНХРОНИЗМ НА ЭТАПЕ СИНХРОНИЗАЦИИ ПО ЦИКЛИЧЕСКОМУ ПРЕФИКСУ СИМВОЛОВ В ТЕХНОЛОГИИ LTE OFDMA

Киселева Т.П., аспирантка кафедры радиотехнических систем Московского технического университета связи и информатики (МТУСИ), e-mail; golzev2011@yandex.ru

CALCULATING THE TIME OF ENTERING SYNCHRONISM AT THE SYNCHRONIZATION STAGE USING A CYCLIC CHARACTER PREFIX IN LTE OFDMA TECHNOLOGY

Kiseleva T.P.

In this paper, a comparative analysis of the time of entering synchronism at the synchronization stage by the correlation function of the cyclic prefix (CP) OFDM symbols of LTE technology in the case of building a CP on binary pseudorandom sequences (PSP) transferred to the interval of the cyclic prefix from the end of characters, or building a CP based on short sequences of Zadoff-Chu (ZC). The calculation formulas for calculating the time of entering into synchronism when they are used in relation to the correlation functions of the CP are given. The results of calculations for the cases of false alarm probabilities $F = 10^{-3}, 10^{-4}, 10^{-5}, 10^{-6}$ for an ideal (no interference) and Rayleigh channel with the addition of additive white Gaussian noise (BGS) at SNR = 10 dB, 0 dB are shown in tables and graphs. Mathematical modeling of CP correlation functions was performed in the MATLAB operating environment for sequences with the number of elements $N = 9, 11, 13, 17, 19, 31, 37$.

Key words: LTE OFDM, Zadoff-Chu sequence (ZC), synchronization, timing, correlation function, OFDM symbol, cyclic prefix, Rayleigh channel, signal – to-noise ratio (SNR).

Ключевые слова: LTE OFDM, последовательность Задова-Чу (ZC), синхронизация, время вхождения в синхронизм, корреляционная функция, OFDM – символ, циклический префикс, Рэлеевский канал, отношение сигнал/шум (SNR).

Введение. Постановка задачи

В работе [1] проведено исследование применения коротких комплексных последовательностей Задова-Чу для заполнения ЦП на этапе синхронизации по корреляционной кривой ЦП. Представлены результаты моделирования в операционной среде MATLAB корреляционных функций циклического префикса, сформированного цифровыми битовыми данными из ПСП и комплексными последовательностями ZC(u,n). Сравнение величин отношения модуля корреляционной функции к среднеквадратической величине боковых лепестков MF_s для комплексных последовательностей Задова-Чу и битовых последовательностей ЦП с одинаковым числом элементов n позволяет судить о преимуществах использования коротких последовательностей ZC(u,n) для заполнения ЦП.

В данной работе ставится задача разработки методики расчета времени вхождения в синхронизм на этапе синхронизации по корреляционной кривой ЦП для случаев использования последовательностей ZC, либо ПСП. Представлены результаты расчетов математического ожидания времени поиска и вхождения в синхронизм T_{CP} для обоих вариантов построения ЦП как в идеальном случае – без искажений помехами канала связи, так и для варианта прохождения через Рэлеевский канал с добавлением БГШ при $SNR = 0 \text{ dB}, 10 \text{ dB}$. В исследовании применялись варианты последовательностей

Проведен сравнительный анализ времени вхождения в синхронизм на этапе синхронизации по корреляционной функции циклического префикса (ЦП) OFDM – символов технологии LTE в случае построения ЦП на двоичных псевдослучайных последовательностях (ПСП), переносимых в интервал циклического префикса с конца символов, либо построения ЦП на основе коротких последовательностей Задова-Чу (ZC). Приведены расчетные формулы вычисления времени вхождения в синхронизм при их использовании применительно к корреляционным функциям ЦП. Результаты вычислений для случаев вероятностей ложной тревоги $F = 10^{-3}, 10^{-4}, 10^{-5}, 10^{-6}$ для идеального (без помех) и Рэлеевского канала с добавлением аддитивного белого Гауссовского шума (БГШ) при $SNR = 10 \text{ dB}, 0 \text{ dB}$ отражены в таблицах и графиках. Математическое моделирование корреляционных функций ЦП проведено в операционной среде MATLAB для последовательностей с числом элементов $N = 9, 11, 13, 17, 19, 31, 37$.

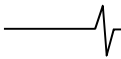
ZC и ПСП с числом элементов $N = 9, 11, 13, 17, 19, 31, 37$ для расчетов T_{CP} в идеальном варианте и при $N = 9, 17$ для случая прохождения Рэлеевского канала с добавлением БГШ при $SNR = 0 \text{ dB}, 10 \text{ dB}$.

Методика расчета среднего времени вхождения в синхронизм на этапе синхронизации по ЦП.

Результаты моделирования

Расчет среднего времени вхождения в синхронизм T_{CP} на этапе синхронизации по циклическому префиксу (ЦП) для ЦП, построенных на псевдослучайных двоичных последовательностях (ПСП) и последовательностях Задова-Чу (ZC) с числом элементов $N = 9, 11, 13, 17, 19, 31, 37$ произведен по формуле [2]

$$m\{T\} \approx \frac{(2-D)(n-1)T_a}{2D},$$



где $mI\{T\}$ – математическое ожидание времени поиска и вхождения в синхронизм, равного T_{CP} для случая ЦП, построенного на ПСП и коротких последовательностях ZC; D – вероятность правильного обнаружения; $T_a = 66,67$ мкс – длительность OFDM-символа, n – число OFDM – символов, используемое для операции усреднения величин, входящих в формулу. В данной методике исследования n принимается равным числу OFDM – символов на длине половины кадра технологии LTE [3]. Вероятность правильного обнаружения [4]:

$$D = \frac{1}{2} \cdot \left[1 + \Phi \left(\frac{r-H}{N_0} \right) \right],$$

где H – пороговый уровень; N_0 – энергетический спектр АБГШ в центральном частотном диапазоне OFDM – символа; r – величина полезного сигнала – в данном случае – пика корреляционной функции ЦП [5]:

$$\Phi(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-t^2} dt - \text{функция Лапласа.}$$

Для чистоты исследования оценки среднего времени вхождения в синхронизм в случаях ЦП, построенных на ПСП и ZC, рассматривается модель идеального канала

без шумов; в расчетной формуле для вероятности правильного обнаружения энергетические величины отношений С/Ш для корреляционных функций ЦП и пороговых величин H_r предлагается заменить отношениями мерит-фактора – отношением энергии главного лепестка корреляционной функций ЦП к суммарной энергии всех боковых лепестков [6]:

$$MF = \frac{R_0}{\sum_i R_i}.$$

В данной работе эта формула соответствует величине

$$MF_s = \frac{ACF_CP_{max}}{\left[\sum_n ACF_CP(n) \right] / n},$$

где ACF_CP_{max} – модуль максимального значения корреляционной функции (ACF) ЦП; $ACF_CP(n)$ – модуль n -го элемента ACF ЦП; n – число элементов ACF ЦП.

Тогда формула расчета D примет вид:

$$D = \frac{1}{2} \cdot \left[1 + \Phi \left(\sqrt{MF_s} - H_r \right) \right].$$

Таблица 1 а ($F = 10^{-3}$)

n	MF _s ЦП В	MF _s ЦП ZC	H _r	D ПСП	D ZC	T _{CP} ПСПмкс	T _{CP} ZCмкс
9	5,1185	10,5526(u=5)	2,19	0,5394	0,7379	6228	3934
11	5,8239	10,4771(u=10)	-«-	0,6222	0,861	5094	3044
13	6,9075	13,5849(u=12)	-«-	0,7331	0,9259	3974	2668
17	7,3123	15,7297(u=13)	-«-	0,76465	0,9332	3716	2629
19	8,9341	17,0529(u=18)	-«-	0,87105	0,9682	2981	2451
31	9,5162	26,1628(u=30)	-«-	0,89595	0,9762	2834	2412
37	10,4457	32,4036(u=36)	-«-	0,9293	0,9838	2650	2376

Таблица 1 б ($F = 10^{-4}$)

n	MF _s ЦП В	MF _s ЦП ZC	H _r	D ПСП	D ZC	T _{CP} ПСПмкс	T _{CP} ZCмкс
9	5,1185	10,5526(u=5)	2,63	0,3016	0,6932	12953	4336
11	5,8239	10,4771(u=10)	-«-	0,37965	0,7065	9817	4211
13	6,9075	13,5849(u=12)	-«-	0,499	0,8326	6919	3225
17	7,3123	15,7297(u=16)	-«-	0,53705	0,86279	6266	3032
19	8,9341	17,0529(u=18)	-«-	0,69465	0,91713	4322	2716
31	8,5162	26,1628(u=30)	-«-	0,7275	0,9375	4023	2607
37	10,4457	32,4036(u=36)	-«-	0,8019	0,9547	3437	2518

Таблица 1 в ($F = 10^{-5}$)

n	MF _s ЦП В	MF _s ЦП ZC	H _r	D ПСП	D ZC	T _{CP} ПСПмкс	T _{CP} ZCмкс
9	5,1185	10,5526(u=5)	3,02	0,142	0,5165	30096	6606
11	5,8239	10,4771(u=10)	-«-	0,19565	0,5205	21212	6538
13	6,9075	13,5849(u=12)	-«-	0,28975	0,7024	13576	4249
17	7,3123	15,7297(u=13)	-«-	0,32755	0,766	11744	3705
19	8,9341	17,0529(u=18)	-«-	0,4825	0,8368	7234	3197
31	8,5162	26,1628(u=30)	-«-	0,53945	0,8935	6228	2848
37	10,4457	32,4036(u=36)	-«-	0,61675	0,9123	5159	2742

Таблица 1 г ($F = 10^{-6}$)

n	MF _s ЦП В	MF _s ЦП ZC	H _r	D ПСП	D ZC	T _{CP} ПСПмкс	T _{CP} ZCмкс
9	5,1185	10,5526(u=5)	3,45	0,04655	0,3098	96523	12549
11	5,8239	10,4771(u=10)	-«-	0,0713	0,311	59707	12492
13	6,9075	13,5849(u=12)	-«-	0,1226	0,5047	35222	6815
17	7,3123	15,7297(u=13)	-«-	0,14575	0,6123	29262	5213
19	8,9341	17,0529(u=18)	-«-	0,2572	0,70054	15586	4267
31	8,5162	26,1628(u=30)	-«-	0,30285	0,8334	12890	3220
37	10,4457	32,4036(u=36)	-«-	0,37895	0,8575	9839	3065

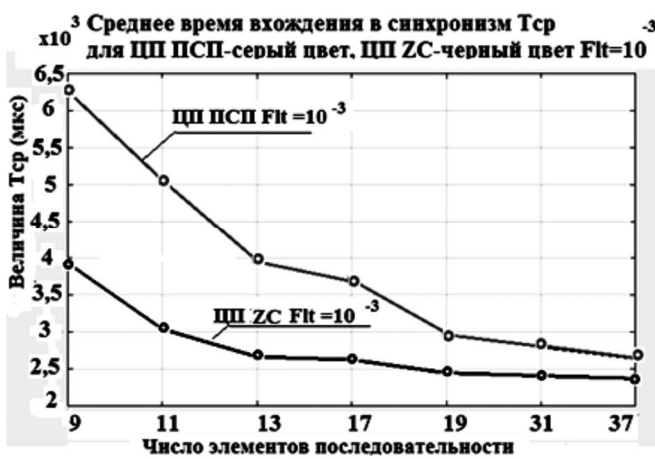


Рис. 1 а. График зависимости T_{cp} на этапе синхронизации по ЦП от числа элементов последовательности $N = 9, 11, 13, 17, 19, 31, 37$ для ЦП на ПСП – серый цвет(вверху) и коротких последовательностей ZC – черный цвет(внизу) при вероятностях ЛТ $F = 10^{-3}$ (слева), $F = 10^{-4}$ (справа)

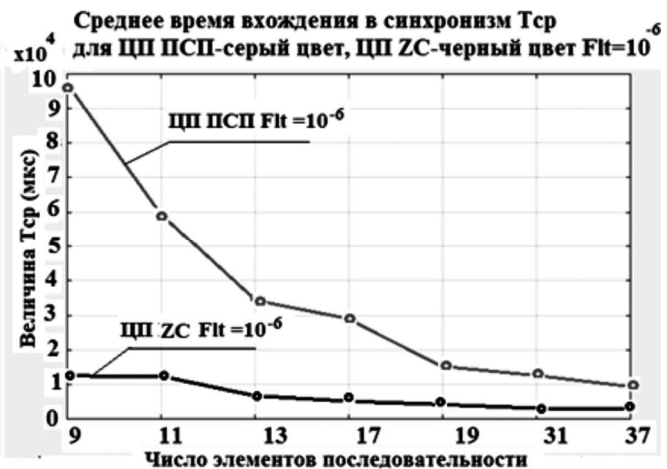
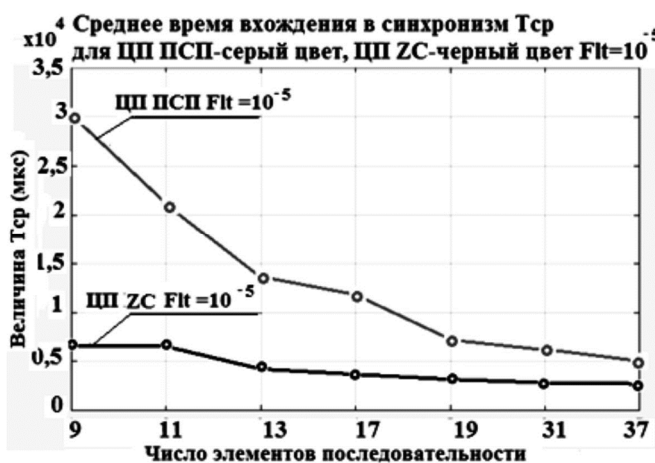


Рис. 1 б. График зависимости T_{cp} на этапе синхронизации по ЦП от числа элементов последовательности $N = 9, 11, 13, 17, 19, 31, 37$ для ЦП на ПСП – серый цвет (вверху) и коротких последовательностей ZC – черный цвет (внизу) при вероятностях ЛТ $F = 10^{-5}$ (слева), $F = 10^{-6}$ (справа)

Порог H_r вычисляется из выражения для величины ложной тревоги (ЛТ) F . Величины ЛТ в данном исследовании задается равной $F=10^{-3}, 10^{-4}, 10^{-5}, 10^{-6}$ и из расчетной формулы [4], $F = \frac{1}{2} \cdot \left[1 - \Phi \left(\frac{H}{N_0} \right) \right] = \frac{1}{2} \times [1 - \Phi(H_r)]$ вычисляется порог для разных значений ЛТ. Результаты вычислений T_{cp} – в табл. 1 а-1 г для $F = 10^{-3}, 10^{-4}, 10^{-5}, 10^{-6}$ соответственно.

Поскольку для различных величин корней u последовательностей ZC(u, n) отношения MF_s различаются, в процессе моделирования были выбраны последовательности с корнями (индексами) u , позволяющими получить максимальную величину MF_s .

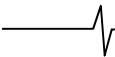
По результатам исследований построены графики зависимости времени вхождения в синхронизм для этапа синхронизации по ЦП от числа элементов последовательности, на которой построен ЦП (рис. 1 а, 1 б), для случая усреднения по числу OFDM – символов ($n = 70$) на длительности половины кадра LTE нисходящего (DL) направления передачи в полосе центральных 72 поднесущих. Вероятность ложной тревоги $F = 10^{-3}, F = 10^{-4}, F = 10^{-5}, F = 10^{-6}$ соответственно.

Результаты сравнительного анализа времени вхождения в синхронизм в случае использования коротких последовательностей ZC и стандартных ПСП ЦП в зависимости от величины вероятности ложной тревоги F приведены в табл. 2.

Таблица 2

F	$K = [(T_{cp_ПСП} - T_{cp_ZC}) / T_{cp_ПСП}] * 100\%$
10^{-3}	40,2 %...10,3 %
10^{-4}	66,5 %...26,7 %
10^{-5}	78,1 %...46,9 %
10^{-6}	87 %...68,8 %

В расчетах D для ЦП на основе последовательностей ZC проведена операция усреднения по величинам D для ЦП OFDM символов полукадра (70 символов). Для данных исследований процесса синхронизации использовались OFDM символы только центральной части частотного диапазона базовой станции сотовой (БС). В кадр на этапе синхронизации входят только 72 центральные поднесущие (рис. 2 [3, 7]). В составе каждого нечетного слота полукадра, кроме двух первых слотов, (в кадре 10 подкадров (subframe), в каждом – 2 слота (slot) – см. рис. 3) в двух первых символах – информация служебного характера, не допускающая замены двоичного ЦП на



последовательности ZC. В первом подкадре от служебной информации свободны только 6 OFDM символов. Четные слоты центральных поднесущих кадра предполагаются свободными от информации пользователей до заполнения всего частотно-временного диапазона ресурсной сетки кадра БС. То есть для замены ЦП OFDM-символов на короткие последовательности ZC на этапе синхронизации могут быть использованы $6 + 12 * 4 = 54$ символа кадра на 72 центральных поднесущих. Для двоичных ЦП символов OFDM используются $8 + 2 * 4 = 16$ символов OFDM (рис.3). Следует отметить, что до завершения синхронизации по ЦП ресурсные элементы референсных сигналов (RS – красные и черные ячейки кадра – рис. 2, 3) не могут использоваться для оценки помеховой ситуации канала связи и считаются свободными. Следовательно, среднее значение вероятности правильного обнаружения для ЦП на основе последовательности ZC D_{cpZC} на длительности полукадра вычисляется из соотношения:

$$D_{cpZC} = \frac{16 * D_{CP_PSP} + 54 * D_{CP_ZC}}{70},$$

где D_{CP_PSP}, D_{CP_ZC} – вероятности правильного обнаружения для пиков корреляционных функций символов OFDM с ЦП двоичных последовательностей и коротких последовательностей ZC соответственно. Здесь под вероятностью правильного обнаружения понимается вероятность точного определения начала символа OFDM.

Поскольку при установлении синхронизации используется только нормальный ЦП OFDM-символов (не расширенный), интересуют результаты для наиболее коротких последовательностей ZC, т.е. 9...17 элементов. Следует отметить, что наибольшую практическую ценность для случая технологии LTE OFDM представляют последовательности с числом элементов $N = 9$ (коэффициент децимации выборки $K_D = 16$ во временной области) и 18 или 17 с добавлением одного нуля с $K_D = 8$. Децимация выборки сигнала позволяет существенно сократить объем вычислений и повысить скорость обработки. Точность определения границ OFDM символов Δt на первом этапе синхронизации вполне достаточна для допустимой точности грубой временной синхронизации по корреляционной функции ЦП. На последующих этапах точность синхронизации повышается с учетом поправок на характеристики канала связи.

$$\Delta t(K_D 16) = \frac{T_{SYM}}{(k_{max} / K_D)} = \frac{66,67mks}{2048 / 16} = 0,52 mks$$

при $K_D = 16$ и

$$\Delta t(K_D 8) = \frac{T_{SYM}}{(k_{max} / K_D)} = \frac{66,67mks}{2048 / 8} = 0,26 mks$$

при $K_D = 8; k_{max} = 2048$ – максимальное число выборки дискретизации OFDM символов технологии LTE [3].

В продолжении исследований для получения результатов, применимых на практике в условиях плотной городской застройки, предлагаются результаты моделирования для коротких последовательностей Задова-Чу и двоичных ПСП ($N = 9, 17$), прошедших канал связи с Рэлеевскими замираниями при добавлении БГШ в случаях

$SNR = 10 dB, 0 dB$. Результаты исследований с усреднением по длине полукадра ($n = 70 - 1 = 69$, т.е. $T_{SYM}/2 = 5 mks$) – в табл. 3 а-3 б при $SNR = 10 dB, 0 dB$ соответственно для вероятностей ЛТ $F = 10^{-3}, 10^{-4}, 10^{-5}, 10^{-6}$.

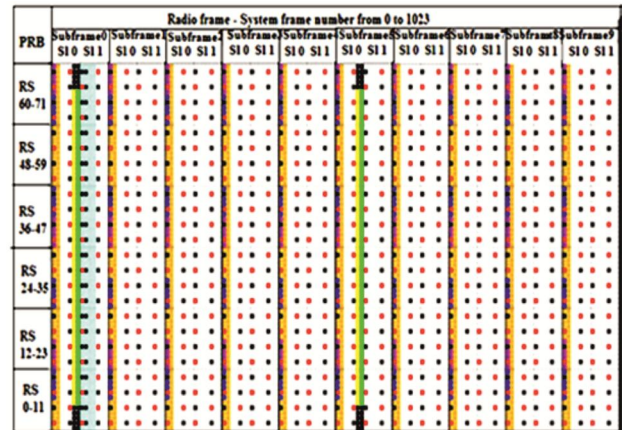


Рис. 2. Структура кадра FDD LTE OFDMA технологии, передаваемого от БС мобильному пользователю на этапе синхронизации. Каждая ячейка – ресурсный элемент (RE), $12 * 7 = 84$ RE – ресурсный блок (RB). Шесть центральных ресурсных блоков содержат 72 центральных поднесущих для передачи первичного синхросигнала (PSS) – зеленый цвет и вторичного синхросигнала (SSS) – желтый цвет RE

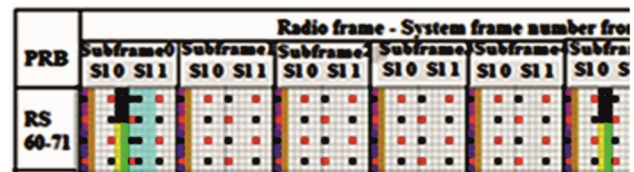


Рис. 3. Фрагмент полукадра технологии LTE OFDMA в увеличенном масштабе – первые 10 слотов со структурой служебной информации для пользователей (PSS, SSS, широкоэвещательный канал, референсные сигналы (RS) – цветные ячейки) и RE – свободные ресурсные элементы – ячейки белого цвета

Параметры Рэлеевского канала связи, приведенные ниже, выбраны автором из предложенного диапазона ресурсов моделей каналов связи операционной системы MATLAB:

- частота дискретизации OFDM символа во временной области – $(1/1920000) c = 0,52$ мкс;
- максимальная частота Допплеровского сдвига несущей частоты передаваемого сигнала – 80 Гц;
- 8 путей распространения сигнала;
- значения задержек по путям распространения (с): 0; $1,7e-7$; $5,2e-7$; $1,6e-6$; $5,1e-6$; $8,1e-6$; $1,1e-5$; $1,5e-5$;
- значения коэффициентов затухания по путям распространения (dB): $-0,5$; $-1,7$; $-2,2$; $-2,6$; $-3,1$; $-4,1$; $-5,6$; $-6,6$;

При моделировании приняты возможные вариации параметров испытаний в пределах 30 %. Усреднение результатов проводилось по половине кадра LTE – технологии, т.е. по 70 OFDM символам или в течение 5 мс.

По результатам вычислений T_{cp} построены графики зависимости среднего времени вхождения в синхронизм для различных значений вероятности ЛТ в зависимости от SNR (рис. 5). Графики серого цвета соответствуют T_{cp} для ЦП на ПСП ($N = 9, 17$), графики черного цвета – T_{cp} для ЦП на последовательностях ZC ($u, n = 9, 17$).

Таблица 3 а (SNR = 10 dB, F = 10⁻³, 10⁻⁴, 10⁻⁵, 10⁻⁶)

n	MF _s ЦП В	MF _s ЦП ZC	F, H _r	D ПСП	D ZC	T _{CP} ПСПмкс	T _{CP} ZCмкс
9	5,177	6,5871	10 ⁻³ ; 2,19	0,54504	0,668	6140	4586
17	6,588	7,9744	-«-	0,7045	0,7886	4230	3533
9	5,177	6,5871	10 ⁻⁴ ; 2,63	0,3078	0,4287	12657	8431
17	6,588	7,9744	-«-	0,4645	0,5761	7603	5685
9	5,177	6,5871	10 ⁻⁵ ; 3,02	0,14605	0,2346	29197	17309
17	6,588	7,9744	-«-	0,2609	0,30107	15332	10440
9	5,177	6,5871	10 ⁻⁶ ; 3,45	0,0483	0,0927	92942	47324
17	6,588	7,9744	-«-	0,1059	0,1692	41139	24888

Таблица 3 б (SNR = 0 dB, F = 10⁻³, 10⁻⁴, 10⁻⁵, 10⁻⁶)

n	MF _s ЦП В	MF _s ЦП ZC	F, H _r	D ПСП	D ZC	T _{CP} ПСПмкс	T _{CP} ZCмкс
9	4,4950	5,6996	10 ⁻³ ; 2,19	0,46001	0,5669	7700	5815
17	6,2322	7,0007	-«-	0,6694	0,7257	4572	4039
9	4,4950	5,6996	10 ⁻⁴ ; 2,63	0,23535	0,3359	17246	11395
17	6,2322	7,0007	-«-	0,42505	0,4916	8523	7058
9	4,4950	5,6996	10 ⁻⁵ ; 3,02	0,1013	0,16854	43112	24994
17	6,2322	7,0007	-«-	0,2295	0,2827	17744	13972
9	4,4950	5,6996	10 ⁻⁶ ; 3,45	0,0299	0,0581	151533	76878
17	6,2322	7,0007	-«-	0,08875	0,1188	49533	36422



Рис. 5. Графики зависимости T_{cp} от SNR(10 dB, 0 dB) для значений вероятности ЛТ F = 10⁻³, 10⁻⁴ на этапе синхронизации по ЦП. Число элементов последовательностей N = 9 (слева), N = 17(справа) Серый цвет – графики T_{cp} для ЦП, построенных на ПСП, черный цвет – для ЦП, построенных на последовательностях ZC

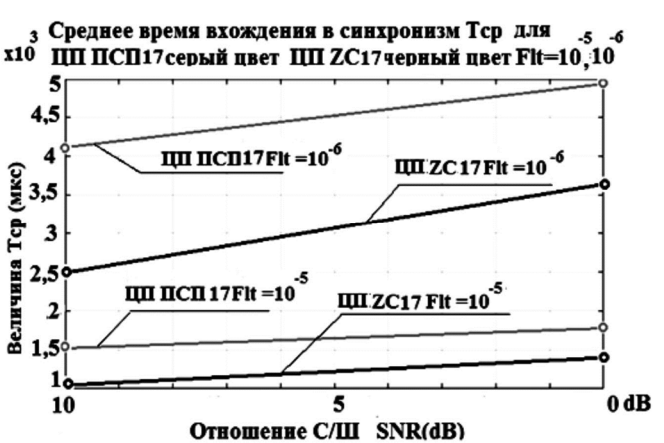


Рис. 6. Графики зависимости T_{cp} от SNR(10dB, 0dB) для значений вероятности ЛТ F = 10⁻⁵, 10⁻⁶ на этапе синхронизации по ЦП. Число элементов последовательностей N = 9 (слева), N = 17(справа) Серый цвет – графики T_{cp} для ЦП, построенных на ПСП, черный цвет – для ЦП, построенных на последовательностях ZC

	SNR = 10 dB, $K = [(T_{CP_ПСП} - T_{CP_ZC}) / T_{CP_ПСП}] * 100 \%$	F	SNR = 0 dB, $K = [(T_{CP_ПСП} - T_{CP_ZC}) / T_{CP_ПСП}] * 100 \%$
10^{-3}	25,3%...16,5%	10^{-3}	24,5%...11,7%
10^{-4}	33,4%...25,2%	10^{-4}	33,9%...17,2%
10^{-5}	40,7%...31,9%	10^{-5}	42,1%...21,3%
10^{-6}	49,1%...39,5%	10^{-6}	49,3%...26,5%

Результаты сравнительного анализа времени вхождения в синхронизм после прохождения канала с Рэлеевскими замираниями в случае использования коротких последовательностей ZC и стандартных ПСП ЦП в зависимости от величины вероятности ложной тревоги F приведены в таблице 4 в 2-х вариантах – при добавлении БГШ с SNR = 10 dB и 0 dB.

Заключение

По результатам исследования время вхождения в синхронизм T_{cp} на этапе синхронизации по корреляционной функции ЦП, как для идеального канала связи, так и для Рэлеевского канала, при вероятностях ЛТ $F = 10^{-4}$, 10^{-5} , 10^{-6} значительно превышает предполагаемое время усреднения 5 мс как для ЦП, построенного на ПСП. Так и для ЦП на последовательностях ZC, причем для последовательностей с $N = 9, 11, 13, 17$ T_{cp} наиболее превышает изначально предполагаемое. Но наблюдается существенная разница для ЦП на ПСП и ZC.

В случае идеального канала (см. табл. 1 а-1 г). превышение предполагаемого времени вхождения в синхронизм (5мс) для коротких последовательностей ZC проявляется только при $F = 10^{-5}$ ($N = 9, 11$), $F = 10^{-6}$ ($N = 9, 11, 13, 17$); для ПСП это превышение – при $F = 10^{-3}$ ($N = 9$), $F = 10^{-4}$ ($N = 9, 11, 13, 17$), $F = 10^{-5}$ ($N = 9, 11, 13, 17, 31, 37$), $F = 10^{-6}$ ($N = 9, 11, 13, 17, 31, 37$). Значения T_{cp} для ЦП на ПСП в 2...8 раз больше, чем для ЦП на коротких последовательностях ZC. В случае Рэлеевского канала (см. табл. 3 а-3 б) значения T_{cp} несколько сближаются по величине для ЦП на ПСП и для ЦП на коротких последовательностях ZC, но тенденции остаются: T_{cp} для ЦП на ПСП в 1,2...2 раза больше, чем для ЦП на коротких последовательностях ZC. Прохождение последовательностей ПСП/ZC через Рэлеевский канал увеличивает среднее время вхождения в синхронизм для коротких последовательностей примерно в 1,2...1,6 раз по сравнению с моделью идеального канала. Наиболее ощутима эта разница для случая вероятности ЛТ $F = 10^{-6}$: при прохождении Рэлеевского канала с добавлением БГШ с SNR = 0 dB (см.

табл. 3 б) для ЦП, построенного на ПСП с числом элементов $N = 9$ $T_{cp} = 151533$ мкс (151,533 ms), т.е. более 15 длительностей кадра технологии LTE ($T_{frame} = 10$ ms [3]). Для ЦП на последовательностях ZC с тем же числом элементов $T_{cp} = 76878$ мкс, т.е. в 2 раза меньше. Из табл. 2, 4 сравнительного анализа T_{cp} для идеального и Рэлеевского канала следует вывод о значительном преимуществе в скорости вхождения в синхронизм на этапе синхронизации по ЦП для использования коротких последовательностей ZC в составе ЦП технологии LTE OFDM.

Литература

1. Киселева Т.П. Использование последовательностей Задова-Чу для синхронизации по корреляционной кривой циклического префикса OFDM – символов LTE технологии. Цифровая обработка сигналов, № 1, 2020, 13-17 с.
2. Журавлев В.И. Поиск и синхронизация в широкополосных системах – М.: Радио и связь, 1986. – 240 с.
3. ETSI TS 136 211 V10.0.0 (2011-01). Technical Specification. – European Telecommunications Standards Institute, 2011. – 104 с. – LTE; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical channels and modulation (3GPP TS 36.211 version 10.0.0 Release 10)
4. Теоретические основы радиолокации. Под ред. Ширмана Я.Д. Учеб. пособие для вузов, М., Сов. Радио, 1970, 560 с.
5. Функция ошибок. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://abakbot.ru/online-16/451-erf> (дата обращения: 10.02.2020).
6. Хасанов М.С., Курганов В.В. Методы определения коэффициентов квазиоптимального КИХ-фильтра свертки псевдослучайной бинарной последовательности. // Общероссийский информационный ресурс. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.mes-conference.ru/data/year2014/pdf/D145.pdf> (дата обращения: 31.10.2018).
7. Primary Synchronization Signal (PSS). [Электронный ресурс] – Режим доступа: http://anisimoff.org/lte/lte_synch.html (дата обращения: 10.02.2019).