

СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ НЕТОЧНОСТИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЛИНИЙ ЗАДЕРЖКИ НА СВОЙСТВА ФОРМИРОВАТЕЛЯ СИГНАЛОВ С ЛИНЕЙНОЙ ЧАСТОТНОЙ МОДУЛЯЦИЕЙ НА ОСНОВЕ БИНАРНЫХ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ СТРУКТУР

Зачиняев Ю.В.¹, Горбунов А.В.¹

¹ ФГАОУ ВПО «Южный федеральный университет», Таганрог, Россия (347922, Таганрог, ул. Чехова, 2), e-mail: yvzach@sfnu.ru

В статье приведены результаты исследования формирователя наносекундных линейно-частотно-модулированных (ЛЧМ) сигналов на основе бинарных волоконно-оптических структур. В частности, проведена оценка влияния погрешности изготовления волоконно-оптических линий задержки, входящих в состав бинарных волоконно-оптических структур, на качество формируемых сигналов. Параметром оценки качества выходного сигнала выбран уровень боковых лепестков автокорреляционной функции выходных ЛЧМ-сигналов. Поскольку экспериментальная оценка требуемой зависимости крайне затруднительна, в качестве метода исследования было предложено моделирование. Моделирование осуществлено в среде MATLAB, при этом погрешность изготовления линий задержки была представлена как нормально распределенная случайная величина, а по результатам испытаний были получены гистограммы распределения уровня боковых лепестков автокорреляционной функции для различных условий. Полученные результаты позволяют определить граничные значения точности изготовления линий задержки для обеспечения заданного уровня боковых лепестков автокорреляционной функции выходного сигнала.

Ключевые слова: ЛЧМ-сигналы, бинарные волоконно-оптические структуры, оптическое волокно

STATISTICAL ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF DELAY LINES MANUFACTURING INACCURACIES ON THE PROPERTIES OF FIBER-OPTIC BASED CHIRP GENERATOR

Zachinyaev Y.V.¹, Gorbunov A.V.¹

¹Southern Federal University, Taganrog, Russia (347922, Taganrog, street Chekhova, 2), e-mail: yvzach@sfnu.ru

The article presents the results of a research of nanosecond-width chirp pulse generator based on binary optical fiber structures. In particular the impact of a manufacturing intolerance of fiber-optic delay lines that are part of binary fiber-optic structures on the quality of the generated signals is assessed. The autocorrelation function sidelobe level of the of output chirp signals was chosen as the quality assess parameter. Since experimental evaluation of the required dependence is extremely difficult modeling is used as a research method. Modeling is done in MATLAB environment. The manufacturing intolerance of the delay lines was presented as a normally distributed random variable. As a result of research the distribution histograms of sidelobes of the autocorrelation function were obtained for different cases. The obtained results allow us to determine the extreme values of precision manufacturing delay lines to ensure a given level of side lobes of the autocorrelation function of the output signal.

Keywords: chirp signal, binary fiber-optic structures, optical fibers

Введение

Область применения сложных радиосигналов с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ) значительно расширилась за последние десятилетия. В областях, связанных с высокой скоростью обработки информации и не требующих высокой дальности действия устройств, наиболее целесообразным видится применение наносекундных широкополосных ЛЧМ-сигналов [1, 5].

Поскольку существующие методы формирования сигналов с ЛЧМ не позволяют обеспечить наносекундную длительность формируемых радиоимпульсов при высоких значениях девиации частоты, актуальным становится использование оптических методов обработки сигналов, в том числе применение для этих целей волоконно-оптических структур [4, 6].

Таким образом, актуальной задачей является разработка и анализ формирователя наносекундных частотно-модулированных радиосигналов с использованием волоконной оптики, а также анализ параметров такого устройства.

В [2] определены перспективы использования волоконной оптики для формирования ЛЧМ-сигналов, а также синтезирована схема устройства, однако не проанализированы вопросы, связанные с влиянием свойства ОВ на функционирование устройства.

Способ формирования радиосигнала с ЛЧМ на бинарных волоконно-оптических структурах (БВОС), проанализированный в [2], предусматривает в составе формирователя источник оптических импульсов (ИОИ) пикосекундной длительности, волоконно-оптический разветвитель (ВОР) на N выходов, $(N - 1)$ волоконно-оптических линий задержек (ВОЛЗ), волоконно-оптический соединитель (ВОС) с N входами, оптический усилитель (ОУ), приемный оптический модуль (ПОМ), полосовой фильтр (ПФ), амплитудный ограничитель (АО), электронный усилитель (ЭУ) и фильтр низких частот (ФНЧ). Структурная схема формирователя ЛЧМ-сигналов на БВОС приведена в [2].

В свою очередь i -я БВОС состоит из Q разделительных направленных волоконных ответвителей (НВО) Y-типа (разд. НВО_{i1}, разд. НВО_{i2}, ..., разд. НВО_{iQ}), Q суммирующих НВО Y-типа (соед. НВО_{i1}, соед. НВО_{i2}, ..., соед. НВО_{iQ}), Q дополнительных ВОЛЗ (ВОЛЗ_{i1}, ВОЛЗ_{i2}, ВОЛЗ_{iQ}) с временем задержки

$$\tau_{зад\ ij} = 2^{j-1} \tau_{зад\ i1}, \quad j = \overline{1, Q}, \quad (1)$$

где j – номер дополнительной ВОЛЗ. При этом $\tau_{зад\ i1} = \tau_{БВОС\ i}$.

Время задержки i -й ВОЛЗ, соединяющей $(i + 1)$ -ю БВОС с $(i + 1)$ -м входом ВОС, определяется по формуле

$$\tau_{зад\ (i-1)} = (K + 1) \sum_{m=1}^{i-1} \tau_{зад\ m1}, \quad (2)$$

где K – число формируемых БВОС копий.

Конструктивные особенности БВОС определяются параметрами формируемого ЛЧМ-сигнала: начальной частотой f_0 , скоростью частотной модуляции β и длительностью $\tau_{ЛЧМ}$.

Если задано количество копий K , формируемых каждой из БВОС, то число выходов ВОР определяется целой частью отношения [5]

$$N = \left\lfloor \frac{\tau_{ЛЧМ} f_c}{K} \right\rfloor, \quad (3)$$

где f_c – центральная частота ЛЧМ-сигнала.

При этом частота следования копий в i -й БВОС составит

$$f_{след i} = f_0 + \frac{\beta}{\pi} [(i-1)K + 0.5K] \frac{1}{f_0 + \sqrt{f_0^2 + \frac{\beta [(i-1)K + 0.5K]}{\pi}}}. \quad (4)$$

Тогда $\tau_{БВОС i} = 1/f_{след i}$.

Следует учитывать, что количество копий K , формируемых в БВОС, всегда кратно двум $K = 2^j$. Причем должно выполняться условие [4]

$$2^j \leq \sqrt{\frac{2\pi f_0^2}{\beta}} + \frac{1}{2} \leq 2^{j+1}. \quad (5)$$

Цель исследования

Целью исследования является анализ влияния физических факторов на качество формирования ЛЧМ-сигналов наносекундной длительности в диапазоне частот порядка 13 ГГц, результатом которого станет возможность уточнения требований к узлам формирователя, подтверждения реализуемости устройства, определения граничных условий применимости устройства, а также для подтверждения работоспособности синтезированной структуры, сопоставления полученных теоретических выкладок с практическим результатом и уточнения требований к используемой волоконно-оптической и электронной элементной базе.

Материал и методы исследования

Рассмотренный выше метод формирования ЛЧМ-сигналов представляет собой некое идеализированное устройство, не учитывающее особенностей реального промышленного изготовления. При физической реализации неизбежно возникнут проблемы точного отреза оптического волокна. Для получения ЛЧМ-сигналов наносекундной длительности требуются ОВ длиной порядка единиц сантиметров, что накладывает серьезные ограничения на уровень погрешности при изготовлении ОВ. Следовательно, анализ влияния данных погрешностей на качество формируемого сигнала является актуальной задачей.

В реальных условиях неточность изготовления ВОЛЗ – случайная величина, подчиняющаяся нормальному закону распределения. Поэтому целесообразным является проведение статистического анализа зависимости уровня боковых лепестков АКФ ЛЧМ-

сигнала от нормально распределенной неточности изготовления ВОЛЗ. При этом следует учитывать, что экспериментальная оценка такой зависимости достаточно затруднительна, поскольку предусматривает многократное произведение точнейших отрезков ОВ и проверку параметров выходных сигналов. Таким образом, единственным методом к оценке влияния данного фактора является моделирование.

В рамках исследования рассматриваемого формирователя ЛЧМ-сигналов проведен синтез и анализ модели подобного устройства со следующими параметрами: длительность формируемого импульса $\tau_{ЛЧМ} = 2,2$ нс, центральная частота $f_c' = 10$ ГГц, девиация частоты $\Delta f' = 5,89$ ГГц.

В качестве основного критерия качества формируемого ЛЧМ-сигнала используется критерий минимума боковых лепестков огибающей автокорреляционной функции сигнала.

Согласно заданным параметрам и в соответствии с (1) – (5) была синтезирована модель формирователя ЛЧМ-сигналов на основе БВОС, учитывающая шумы устройства, в частности амплитудные шумы ПОМ, шумы оптического усилителя, дробовые, тепловые, темновые шумы фотодиода ПРОМ, тепловые шумы электронного усилителя; изменения температуры окружающей среды и неточность изготовления ВОЛЗ, входящих в состав БВОС. Структура модели имеет вид, изображенный на рис. 1.

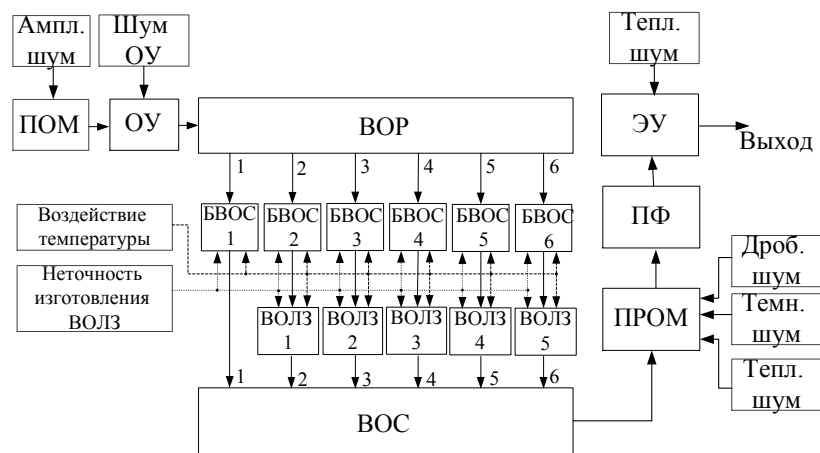


Рис. 1. Структурная схема модели формирователя ЛЧМ-сигналов на основе БВОС

Наиболее распространенной формой представления выборочных данных являются вариационные ряды и графические изображения распределений.

Для построения графических изображений распределений использованы встроенные возможности пакета MATLAB. В рамках исследования проведено по 100 испытаний для различных граничных значений погрешности изготовления линий задержки.

Входным параметром при проведении испытаний является случайная величина погрешности изготовления ВОЛЗ при постоянстве шумовых и температурных факторов, учитываемых моделью, представленной на рис. 1.

Результаты исследования

При максимальной погрешности изготовления ВОЛЗ $\Delta L_{\text{ВОЛЗ}i} = 0,01$ мм диапазон изменения времени задержки ВОЛЗ $d\tau = 9,76 \cdot 10^{-14}$ с. Функция плотности нормального распределения изменения времени задержки ВОЛЗ $f(d\tau)$ при этом принимает вид [1]:

$$f(d\tau) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(d\tau - \mu)^2}{2\sigma^2}\right), \quad (6)$$

где σ^2 – дисперсия плотности распределения изменения времени задержки ВОЛЗ, μ – математическое ожидание плотности распределения изменения времени задержки ВОЛЗ.

При $d\tau = 9,76 \cdot 10^{-14}$ с распределение будет иметь параметры $\mu=0$, а $\sigma^2 = 23,81 \cdot 10^{-28}$. Статистический анализ уровня боковых лепестков АКФ на выходе формирователя ЛЧМ-сигналов на БВОС без амплитудного взвешивания (а) и с амплитудным взвешиванием (б) при такой неточности изготовления ВОЛЗ изображен на рис. 2.

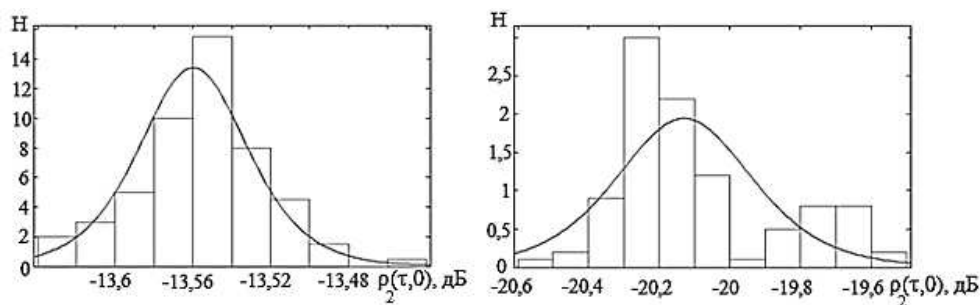


Рис. 2. Гистограмма распределения значения боковых лепестков огибающей АКФ при нормальном распределении неточности изготовления ВОЛЗ при $\mu=0$, $\sigma^2 = 23,81 \cdot 10^{-28}$

Гистограммы, изображенные на рис. 2, характеризуют статистический анализ зависимости уровня боковых лепестков огибающей АКФ ЛЧМ-сигнала, сформированного согласно модели формирователя на основе БВОС, от нормально распределенной неточности изготовления ВОЛЗ с мат. ожиданием $\mu=0$ и дисперсией $\sigma^2 = 23,81 \cdot 10^{-28}$.

Анализ показал, что распределение значений уровня боковых лепестков огибающей АКФ при заданном распределении неточности изготовления ВОЛЗ, приближается к логистическому закону распределения с мат. ожиданием $\mu = -13,56$ и дисперсией $\sigma^2 = 0,0011$ для формирователя без амплитудного взвешивания и с мат. ожиданием $\mu = -20,12$ и дисперсией $\sigma^2 = 0,05$ для формирователя с амплитудным взвешиванием.

При максимальной погрешности изготовления ВОЛЗ $\Delta L_{\text{ВОЛЗ},i} = 0,1$ мм диапазон изменения времени задержки ВОЛЗ $d\tau = 9,76 \cdot 10^{-13}$ с. Функция плотности нормального распределение изменения времени задержки ВОЛЗ $f(d\tau)$ описывается выражением (6), при этом $\mu=0$, а $\sigma^2 = 23,81 \cdot 10^{-26}$. Статистический анализ уровня боковых лепестков АКФ на выходе формирователя ЛЧМ-сигналов на БВОС без амплитудного взвешивания (а) и с амплитудным взвешиванием (б) при такой неточности изготовления ВОЛЗ изображен на рис. 3.

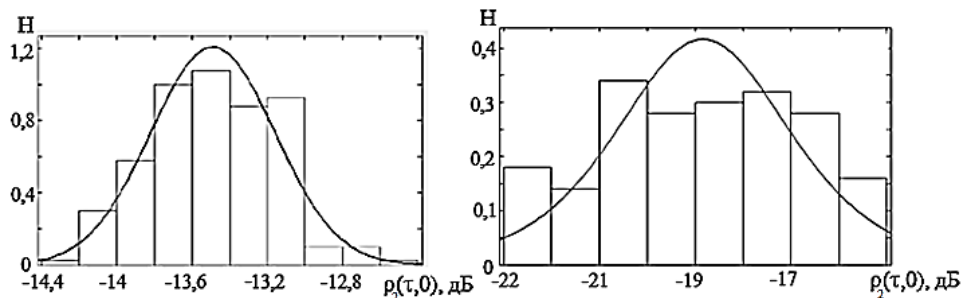


Рис. 3. Гистограмма распределения значения боковых лепестков огибающей АКФ при нормальном распределении неточности изготовления ВОЛЗ при $\mu=0$, $\sigma^2 = 23,81 \cdot 10^{-26}$

Гистограммы, изображенные на рис. 3, характеризуют статистический анализ зависимости уровня боковых лепестков огибающей АКФ ЛЧМ-сигнала, сформированного согласно модели формирователя на основе БВОС, от нормально распределенной неточности изготовления ВОЛЗ с мат. ожиданием $\mu=0$ и дисперсией $\sigma^2 = 23,81 \cdot 10^{-26}$.

Анализ показал, что распределение значений уровня боковых лепестков огибающей АКФ при заданном распределении неточности изготовления ВОЛЗ, подчиняется логистическому закону распределения с мат. ожиданием $\mu = -13,48$ и дисперсией $\sigma^2 = 0,11$ для формирователя без амплитудного взвешивания и с мат. ожиданием $\mu = -19,90$ и дисперсией $\sigma^2 = 0,1$ для формирователя с амплитудным взвешиванием.

При максимальной погрешности изготовления ВОЛЗ $\Delta L_{\text{ВОЛЗ},i} = 0,5$ мм диапазон изменения времени задержки ВОЛЗ $d\tau = 4,88 \cdot 10^{-12}$ с.

Функция плотности нормального распределения изменения времени задержки ВОЛЗ $f(d\tau)$ описывается выражением (6), при этом $\mu=0$, а $\sigma^2 = 23,8 \cdot 10^{-24}$. Статистический анализ уровня боковых лепестков АКФ на выходе формирователя ЛЧМ-сигналов на БВОС без амплитудного взвешивания (а) и с амплитудным взвешиванием (б) при такой неточности изготовления ВОЛЗ изображен на рис. 4.

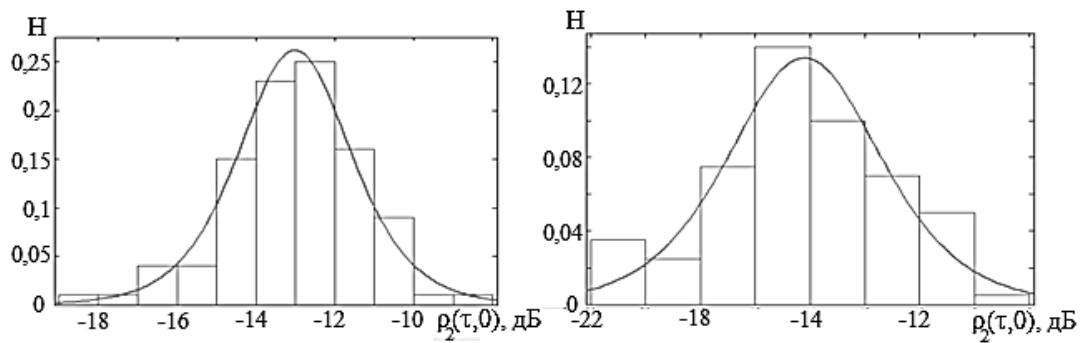


Рис. 4. Гистограмма распределения значения боковых лепестков огибающей АКФ при нормальном распределении неточности изготовления ВОЛЗ при $\mu=0$, $\sigma^2=23,8 \cdot 10^{-24}$

Гистограммы, изображенные на рис. 4, характеризуют статистический анализ зависимости уровня боковых лепестков огибающей АКФ ЛЧМ-сигнала, сформированного согласно модели формирователя на основе БВОС, от нормально распределенной неточности изготовления ВОЛЗ с мат. ожиданием $\mu=0$ и дисперсией $\sigma^2=23,8 \cdot 10^{-24}$.

Анализ показал, что распределение значений уровня боковых лепестков огибающей АКФ при заданном распределении неточности изготовления ВОЛЗ, подчиняется логистическому закону распределения с мат. ожиданием $\mu=-13,07$ и дисперсией $\sigma^2=2,9941$ для формирователя без амплитудного взвешивания и с мат. ожиданием $\mu=-14,20$ и дисперсией $\sigma^2=1,86$ для формирователя с амплитудным взвешиванием. Обобщим полученные данные в табл. 1.

Табл. 1. Зависимость статистических параметров уровня боковых лепестков АКФ ЛЧМ-сигнала от нормально распределенной неточности изготовления ВОЛЗ

Погрешность $\Delta L_{ВОЛЗi}$, мм	0,01	0,1	0,2	0,5
μ , дБ	-13,56	-13,48	-13,49	-13,07
μ (ампл. взв.), дБ	-20,12	-19,90	-19,40	-14,20
σ^2 , дБ	0,0011	0,11	0,5408	2,9941
σ^2 (ампл. взв.), дБ	0,05	0,1	0,16	1,86

Графический вид зависимости статистических параметров распределения значений уровня боковых лепестков огибающей АКФ при заданном распределении неточности изготовления ВОЛЗ приведен на рис. 5.

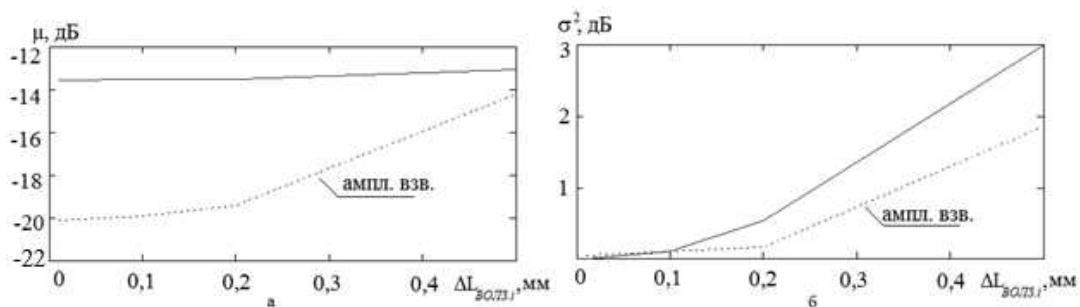


Рис. 5. Зависимость математического ожидания (а) и дисперсии значений уровня боковых лепестков огибающей АКФ (б) при заданном распределении неточности изготовления ВОЛЗ

Выводы

Из полученных данных можно сделать вывод, что с увеличением значения неточности изготовления ВОЛЗ происходит плавное увеличение математического ожидания уровня боковых лепестков АКФ и рост дисперсии. При этом распределение уровня боковых лепестков АКФ стремится к логистическому закону. Согласно данным анализа модели формирователя с амплитудным взвешиванием при увеличении неточности изготовления ВОЛЗ, мат. ожидание и дисперсия изменяются аналогично случаю без амплитудного взвешивания, при этом уровень боковых лепестков ограничен значением 20,1 дБ, что на 6 дБ меньше значения при идеальном изготовлении ВОЛЗ.

При увеличении неточности изготовления ВОЛЗ происходит увеличение уровня боковых лепестков огибающей АКФ, при этом для ЛЧМ-сигнала длительностью 2,2 нс граничными значения точности изготовления ВОЛЗ с точки зрения соответствия сигнала критерию, сформулированному в главе 2, являются минус 0,01 мм снизу и 0,1 мм сверху.

Список литературы

1. Вентцель Е.С. Теория вероятностей. 4-е изд., стереотип. – М.: Наука, Физматгиз, 1969. – 576 с.
2. Зачиняев Ю. В., Румянцев К. Е., Кукуяшный А. В. Формирование наносекундных ЛЧМ-радиосигналов на волоконно-оптических структурах // Электротехнические и информационные системы и комплексы. – 2011. – Т.7. - №3. – С. 32-38.
3. Кочемасов В. Н., Белов Л. А., Оконешников В. С. Формирование сигналов с линейной частотной модуляцией. – М.: Радио и связь, 1983. – 192 с.
4. Кукуяшный А.В., Румянцев К.Е. Обобщенная модель динамического запоминающего устройства на волоконно-оптических структурах с оптическим усилением // Северо-Кавказский регион. Технические науки. – 1999. - №3. – С. 61-67.

5. Кукуяшный А.В. Особенности формирования ЛЧМ сигналов с использованием волоконно-оптических структур // Информационное противодействие терроризму. – 2007. - №9. – С. 75-88.
6. Румянцев К.Е., Горбунов А.В. Динамические запоминающие устройства на основе бинарных волоконно-оптических структур // Радиотехника. – 2002. - №12. – С.73-80.

Рецензенты:

Румянцев К.Е., д.т.н., профессор, заведующий кафедрой ИБТКС, Южный федеральный университет, г. Таганрог.

Веселов Г.Е., д.т.н., доцент, директор института компьютерных технологий и информационной безопасности, Южный федеральный университет, г. Таганрог.