

УДК 621.396.967

## МЕТОДИКА ПРОЕКТИРОВАНИЯ ФОРМИРОВАТЕЛЯ СИГНАЛОВ С ЛИНЕЙНОЙ ЧАСТОТНОЙ МОДУЛЯЦИЕЙ НА ОСНОВЕ БИНАРНЫХ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ СТРУКТУР

**Зачиняев Ю.В.**

*ФГАОУ ВПО «Южный федеральный университет», Таганрог, 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, определена методика проектирования и определения структуры устройства формирования ЛЧМ-сигналов наносекундной длительности по таким параметрам, как длительность формируемого сигнала, требуемая девиация частоты, центральная частота требуемого сигнала, выходная мощность и отношение сигнал/шум на выходе формирователя. На основе значений данных параметров с использованием ряда аналитических выражений можно синтезировать структурную схему формирователя и определить параметры узлов, входящих в его состав. Приведен пример проектирования формирователя, моделирование которого в пакете MATLAB подтвердило эффективность предложенной методики. Полученные результаты позволяют подготовить научную основу для промышленного изготовления формирователей ЛЧМ-сигналов на основе БВОС.

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

## METHOD OF THE CHIRP GENERATOR DESIGN USING THE BINARY FIBER-OPTIC STRUCTURES

**Zachinyaev Y.V.**

*Southern Federal University, Taganrog, 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 a technique of design and defining the structure of nanosecond-width chirp pulse generator is formulated using such parameters as the length of a generated signal, the required frequency deviation, the center frequency of the desired signal, the output power and signal / noise ratio at the output of the chirp generator. Based on the values of these parameters and using a number of analytical expressions a block diagram of the generator can be synthesized and the parameters of the blocks in its composition can be determined. An example of the design of generator is given and the simulation in MATLAB confirmed the effectiveness of the proposed method. The obtained results allow creating a scientific basis for the industrial manufacture of the nanosecond-width chirp pulse generator.

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

В [4] предложены структура устройства и метод формирования линейно-частотно-модулированных (ЛЧМ) сигналов наносекундной длительности на основе бинарных волоконно-оптических структур (БВОС). Формирователь включает в себя совокупность последовательно соединенных источника оптического излучения в виде передающего оптического модуля (ПОМ), волоконного разветвителя (ВОР) и сумматора (ВОС), особо сконфигурированных волоконно-оптических компонентов (БВОС), волоконно-оптических линий задержки (ВОЛЗ), оптического усилителя (ОУ), приемного оптического модуля (ПРОМ), полосового фильтра (ПФ) для выделения первой гармоники спектра, электронного усилителя (ЭУ) и фильтра низких частот (ФНЧ) (рис. 1).

При этом структура непосредственно БВОС включает в себя разделительные и суммирующие направленные волокон-

ные ответвители (НВО) и ВОЛЗ и приведена на рис. 2.

В зависимости от требуемых параметров выходных сигналов, в частности значения длительности сигнала, девиации частоты, центральной частоты сигнала, схема формирователя на БВОС и структура самих БВОС изменяется.

Для промышленного изготовления формирователя ЛЧМ-сигналов на БВОС необходимо в первую очередь для заданных параметров выходных сигналов определить структуру формирователя, поэтому задача синтеза алгоритма проектирования данного устройства является актуальной.

**Целью исследования** является разработка научной основы для промышленного изготовления формирователей ЛЧМ-сигналов на основе, а также уточнение требований к узлам формирователя и подтверждение реализуемости устройства.

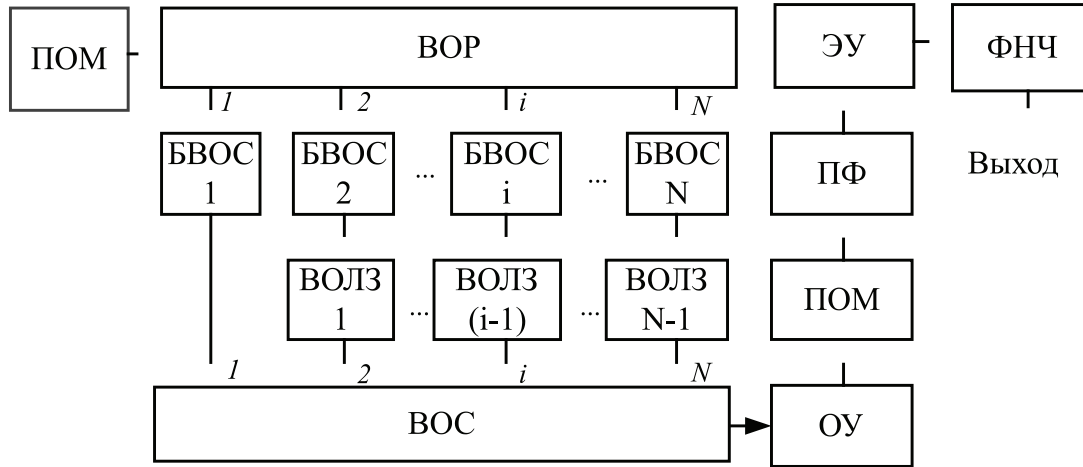


Рис. 1. Структурная схема формирователя ЛЧМ-сигналов на основе БВОС

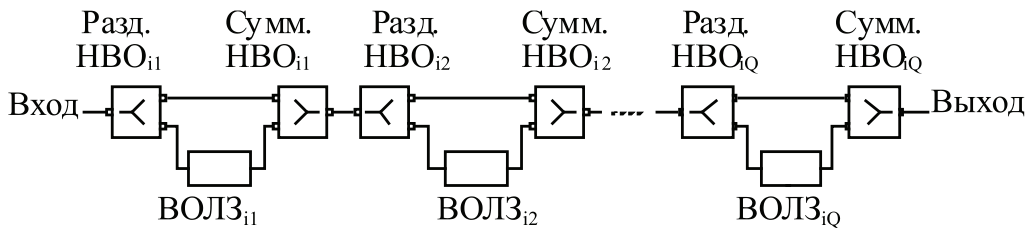


Рис. 2. Структурная схема БВОС

**Материал и методы исследования**

Исходными данными для проектирования формирователя ЛЧМ-сигналов являются длительность формируемого сигнала  $\tau_{\text{ЛЧМ}}$ , центральная частота ЛЧМ-сигнала  $f_c$ , девиация частоты ЛЧМ-сигнала  $\Delta f$ , требуемая мощность выходного сигнала  $P_{\text{вых}}$ , средняя мощность оптического излучения ПОМ  $P_{\text{ПОМ}}$ , отношение сигнал/шум на выходе формирователя  $SNR$  [3].

Алгоритм проектирования формирователя, предлагаемый автором, состоит из следующих основных этапов: синтез структуры формирователя ЛЧМ-сигналов; выбор параметров функциональных элементов формирователя ЛЧМ-сигналов; произведение расчетов потерь мощности сигнала в узлах формирователя; уточнение выходных параметров формирователя в соответствии с полученной структурой.

Рассмотрим подробнее этап синтеза структуры формирователя. Определение структуры формирователя ЛЧМ-сигналов на основе БВОС включает в себя выполнение следующих расчетов с помощью соответствующих формул:

1. Определение числа копий, формируемых БВОС [5]:

$$K = 2^P \leq \left( f_c - \frac{\Delta f}{2} \right) \sqrt{\frac{2\pi\tau_{\text{ЛЧМ}}}{\Delta f}} + 0,5, \quad P = \overline{0, h}. \quad (1)$$

2. Расчет числа БВОС [5]:

$$N = \left\lceil \frac{1}{K} \tau_{\text{ЛЧМ}} f_c \right\rceil. \quad (2)$$

3. Определение числа НВО X-типа:

$$X = (\log_2 K - 1). \quad (3)$$

4. Определение числа дополнительных ВОЛЗ:

$$Q = \log K. \quad (4)$$

5. Определение числа ВОЛЗ формирователя ЛЧМ-сигналов на БВОС:

$$N' = N - 1. \quad (5)$$

6. Определение числа выводов волоконно-оптического разделителя и волоконно-оптического сумматора:

$$N^* \geq N, \quad P = \overline{0, h}. \quad (6)$$

Выбор параметров структурных элементов формирователя ЛЧМ-сигналов осуществляется в процессе выполнения следующих операций.

1. Определение длительности импульса ПОМ [4, 5]:

$$T_{\text{ПОМ}} \geq \frac{1}{2f_{\text{след}N}} = \frac{1}{2 \left[ f_0 + \frac{\Delta f}{\tau_{\text{ЛЧМ}}\pi} [(i-1)K + 0,5K] - \frac{1}{f_0 + \sqrt{f_0^2 + \frac{\Delta f [(i-1)K + 0,5K]}{\tau_{\text{ЛЧМ}}\pi}}} \right]}. \quad (7)$$

2. Определение времени задержки  $j$ -й дополнительной ВОЛЗ в составе  $i$ -й БВОС [4,5]

$$\tau_{\text{зад}ij} = 2^{j-1} \left( f_0 + \frac{\Delta f}{\tau_{\text{ЛЧМ}} \pi} [(i-1)K + 0,5K] \frac{1}{f_0 + \sqrt{f_0^2 + \frac{\Delta f [(i-1)K + 0,5K]}{\tau_{\text{ЛЧМ}} \pi}}} \right). \quad (8)$$

3. Определение времени задержки ВОЛЗ формирователя [4, 5]

$$\tau_{\text{зад}i} = (K+1) \sum_{m=1}^i \tau \left( f_0 + \frac{\Delta f}{\tau_{\text{ЛЧМ}} \pi} [(i-1)K + 0,5K] \frac{1}{f_0 + \sqrt{f_0^2 + \frac{\Delta f [(i-1)K + 0,5K]}{\tau_{\text{ЛЧМ}} \pi}}} \right). \quad (9)$$

4. Определение потерь в оптической части формирователя [2]

$$\alpha_{\text{опт}} = \alpha_{\text{ввод}} + X \gamma_{\text{нво}} + k_{\text{отв}} + 2X \alpha_{\text{нво-ов}} + \alpha_{\text{ПОМ-ВОР}} + \alpha_{\text{вос-ос}} + \alpha_{\text{ос-оу}} + \alpha_{\text{оу-пром}} + \alpha_{\text{пром}} + \alpha_{\text{вв.ВОС}} + \frac{\tau_{\text{зад}1}}{4,88 \cdot 10^{-6}} \cdot \Gamma_{\text{ов}} + \frac{\tau_{\text{зад}11}}{4,88 \cdot 10^{-6}} \cdot \Gamma_{\text{ов}} + \frac{\tau_{\text{зад}11} + \tau_{\text{зад}1}}{4,88 \cdot 10^{-9}} \cdot \pi D_{\text{кат}} \alpha_{\text{виток}}, \quad (10)$$

где  $\alpha_{\text{ввод}}$  рассчитывается согласно таблице,

$$\gamma_{\text{нво}} = 0,1 \text{ дБ}, \quad k_{\text{отв}} = 3 \text{ дБ}, \quad \alpha_{\text{вв.ВОС}} = 0,3 \text{ дБ}, \quad \Gamma_{\text{ов}} = 0,2 \text{ дБ},$$

$$\alpha_{\text{нво-ов}} = \alpha_{\text{ПОМ-ВОР}} = \alpha_{\text{вос-ос}} = \alpha_{\text{ос-оу}} = \alpha_{\text{оу-пром}} = \alpha_{\text{пром}} = 0,1 \text{ дБ}, \quad D_{\text{кат}} = 0,05 \text{ м}, \quad \alpha_{\text{виток}} = 0,00005 \text{ дБ}.$$

5. Определение потерь в СВЧ-тракте формирователя ЛЧМ-сигналов на основе БВОС осуществляется согласно спецификациям компонентов. Для формирователя при стандартной конфигурации функциональных узлов (полосовой фильтр, ФНЧ, соединения)

$$\alpha_{\Sigma \text{рад}} = 2,3 \text{ дБ}.$$

6. Для определения мощности оптического излучения на входе ПРОМ по заданному отношению

сигнал/шум SNR учтем результаты исследования шумовых свойств формирователя, проведенного ранее [2]. Было показано, что отношение сигнал/шум на выходе формирователя ЛЧМ-сигналов на основе БВОС в большой степени определяется мощностью ОИ на входе ПРОМ. Таким образом, можно рассчитать необходимую мощность ОИ на входе ПРОМ при требуемом отношении сигнал/шум на выходе формирователя по формуле [2]:

$$P_{\text{ПРОМ}} = \frac{-10^{\frac{\text{SNR}}{20}} \cdot \sqrt{2q \varepsilon_{\text{ФД}} \Delta f} - \sqrt{\left( \frac{10^{\frac{\text{SNR}}{20}} \cdot \sqrt{2q \varepsilon_{\text{ФД}} \Delta f}}{\varepsilon_{\text{ФД}}} \right)^2} + \frac{4}{\varepsilon_{\text{ФД}}} \left( 10^{\frac{\text{SNR}}{20}} \cdot \left( \sqrt{2q i_{\text{темп.т}} \Delta f} + \frac{\sqrt{(\text{Ш}_{\Sigma \text{У}} - 1) k_{\text{Б}} T \Delta f}}{R_{\text{н.ЭУ}} K_{\Sigma \text{У} \text{max}}} \right)} \right)}{2 \varepsilon_{\text{ФД}}} \quad (11)$$

$$+ \frac{\sqrt{\frac{4k_{\text{Б}} T \Delta f}{R_{\text{н.ФД}}} + \frac{\hbar c^2 \Delta \lambda (G-1) \varepsilon_{\text{ФД}}}{2 \lambda N F (n_a)^2 (\lambda^2 - 0,25(\Delta \lambda)^2)} + \eta \frac{q P_{\text{ПОМ}}}{(h \nu)} \sqrt{RIN \cdot \Delta f}}}{2 \varepsilon_{\text{ФД}}} + \frac{\hbar c^2 \Delta \lambda (G-1) \varepsilon_{\text{ФД}}}{2 \lambda N F (n_a)^2 (\lambda^2 - 0,25(\Delta \lambda)^2)},$$

где  $RIN = -165 \text{ дБ}$ ,  $T = 300 \text{ К}$ ,  $i_{\text{темп.т}} = 5 \text{ нА}$ ,  $\text{Ш}_{\Sigma \text{У}} = 4,5 \text{ дБ}$ ,  $\varepsilon_{\text{ФД}} = 0,7 \text{ А/Вт}$ ,  $\lambda = 1550 \text{ нм}$ ,  $\Delta \lambda_{\text{оу}} = 30 \text{ нм}$ ,  $G = 24 \text{ дБ}$ ,  $n_a = 3,6$ ,  $\nu = 1,93 \cdot 10^{14} \text{ Гц}$ ,  $\eta = 0,1$ ,  $df = 6,6 \cdot 10^9 \text{ Гц}$ ,  $P_{\text{имп.ПОМ}} = J_{\text{ср}} / (T_{\text{ном}} \cdot 80 \cdot 10^6)$ ,  $k_{\text{Б}} = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К}$ ,  $\hbar = 1,0546 \cdot 10^{-34} \text{ Дж}\cdot\text{с}$ .

7. Определение коэффициента усиления оптического усилителя:

$$K_{\text{ОУ}} = P_{\text{пром}} - \overline{P_{\text{ПОМ}}} + \alpha_{\text{опт}}. \quad (12)$$

8. Определение коэффициента усиления электронного усилителя:

$$K_{\Sigma \text{У}} = P_{\text{вых}} - P_{\text{в.ПРОМ}} + \alpha_{\text{рад}}. \quad (13)$$

При этом мощность на выходе ПРОМ  $P_{\text{в.ПРОМ}}$  определяется формулой

$$P_{\text{в.ПРОМ}} = P_{\text{ПРОМ}} \cdot \varepsilon_{\text{ФД}} \cdot U_{\text{вых.ПРОМ}}, \quad (14)$$

где  $U_{\text{вых.ПРОМ}}$  – выходное напряжение ПРОМ ( $U_{\text{вых.ПРОМ}} = 0,7-0,9 \text{ В}$  для большинства ПРОМ).

9. Определение порядка ПФ  $z$  осуществляется путем нахождения коэффициента прямоугольности  $K_{\Pi}$  по формуле [1]:

$$K_{\Pi} \leq \frac{2f_c - \Delta f}{\Delta f} = \frac{2f_c}{\Delta f} - 1, \quad (15)$$

после чего определяется значение  $z$ , при котором используется форма АЧХ для ФНЧ [5]:

$$G^2(f) = \frac{G_0^2}{1 + \left(\frac{f}{f_{cp}}\right)^{2z}}, \quad (16)$$

удовлетворяет требованию по коэффициенту прямоугольности.

10. Уточнение параметров формирователя ЛЧМ-сигналов на основе БВОС.

Для этого последовательно рассчитываются:

– ширина спектра ЛЧМ-сигнала [5]:

$$\Delta f' = \frac{\Delta f NK}{\tau_{лчм} \pi} \cdot \frac{1}{f_0 + \sqrt{f_0^2 + \frac{\Delta f NK}{\tau_{лчм} \pi}}}; \quad (17)$$

– центральная частота спектра ЛЧМ-сигнала [5]:

$$f'_c = f_0 + \frac{\Delta f NK}{2\tau_{лчм} \pi} \cdot \frac{1}{f_0 + \sqrt{f_0^2 + \frac{\Delta f NK}{\tau_{лчм} \pi}}}; \quad (18)$$

– длительность результирующего импульса [5]:

$$T'_c = \frac{1}{NK} \left( f_0 + \frac{\Delta f NK}{2\tau_{лчм} \pi} \cdot \frac{1}{f_0 + \sqrt{f_0^2 + \frac{\Delta f NK}{\tau_{лчм} \pi}}} \right). \quad (19)$$

### Результаты исследования и их обсуждение

С учетом полученных аналитических выражений произведено проектирование формирователя ЛЧМ-сигналов с длительностью формируемого сигнала  $\tau_{лчм} = 2,2$  нс, центральной частотой ЛЧМ-сигнала  $f_c = 10$  ГГц, девиацией частоты ЛЧМ-сигнала  $\Delta f = 5,7$  ГГц, требуемой мощностью выходного сигнала

$P_{\text{вых}} = 100$  мВт, средней мощностью оптического излучения ПОМ  $J_{cp} = 10$  мкВт и отношением сигнал/шум на выходе формирователя  $SNR = 50$  дБ.

1. Определено число копий, формируемых БВОС, по формуле (1):

$$K = 2^P \leq 7,2 \cdot 10^9 \sqrt{\frac{2\pi \cdot 2,2 \cdot 10^{-9}}{5,7 \cdot 10^9}} + 0,5 = 4.$$

2. Рассчитано число БВОС по формуле (2):

$$N = \left\lfloor \frac{1}{4} 2,2 \cdot 10^{-9} (10^{10}) \right\rfloor = 6.$$

3. Определено число направленных волоконных ответвителей X-типа по формуле (3):

$$X = (\log 4 - 1) = 1.$$

4. Рассчитано число дополнительных ВОЛЗ по формуле (4):

$$Q = \log_2 4 = 2.$$

5. Определено число ВОЛЗ формирователя ЛЧМ-сигналов по формуле (5):

$$N' = 6 - 1 = 5.$$

6. Рассчитано число выводов волоконно-оптического разделителя и волоконно-оптического сумматора по формуле (6):

$$N^* = 2^P \geq 6 = 8.$$

На основе проведенных расчетов синтезирована структурная схема формирователя ЛЧМ-сигналов длительностью  $\tau_{лчм} = 2,2$  нс при центральной частоте  $f_c = 10$  ГГц и девиации частоты ЛЧМ-сигнала  $\Delta f = 5,7$  ГГц (рис. 3).

При этом БВОС можно представить в виде, изображенном на рис. 4.

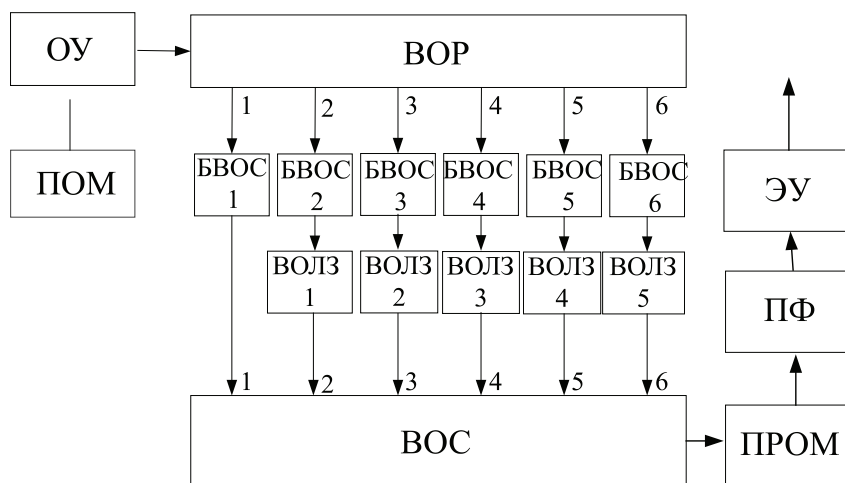


Рис. 3. Структура формирователя ЛЧМ-сигналов на БВОС ( $\tau_{лчм} = 2,2$  нс,  $\Delta f = 5,7$  ГГц)

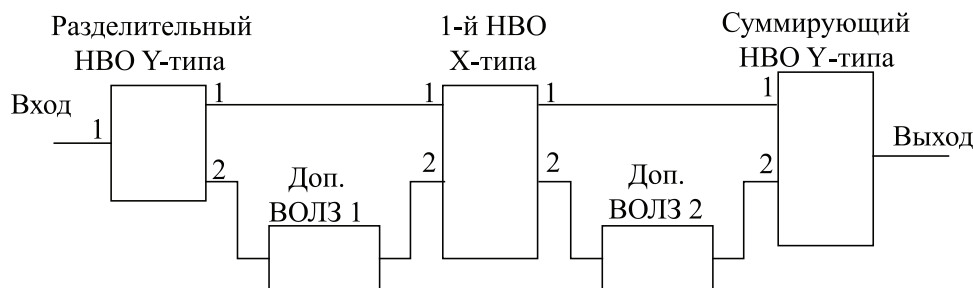


Рис. 4. Структура БВОС формирователя ЛЧМ-сигналов ( $\tau_{\text{ЛЧМ}} = 2,2 \text{ нс}$ ,  $\Delta f = 5,7 \text{ ГГц}$ )

В рамках выбора параметров структурных элементов формирователя ЛЧМ-сигналов:

1. Определена длительность оптического импульса ПОМ по формуле (7):

$$T_{\text{ПОМ}} \geq 41 \text{ пс.}$$

2. Рассчитано время задержки  $j$ -й дополнительной ВОЛЗ в составе  $i$ -й БВОС на основе формулы (8). Результаты расчета  $\tau_{\text{зад}i1}$  и  $\tau_{\text{зад}i2}$  сведены в таблице.

3. Определено время задержки ВОЛЗ  $\tau_{\text{зад}i}$  формирователя на основе формулы (9). Результаты расчета сведены в таблице.

$$\alpha_{\text{опт}} = 10,5 + 0,2 + 6 + 0,4 + 0,8 + 0,08 \cdot 10^{-3} + 0,01 \cdot 10^{-3} + 0,15 \cdot 10^{-3} = 17,9 \text{ дБ.}$$

Рассчитан уровень потерь в СВЧ-тракте формирователя согласно таблице:

$$\alpha_{\Sigma \text{рад}} = 2,3 \text{ дБ.}$$

5. Определена мощность оптического излучения на входе ПРОМ по заданному соотношению сигнал/шум  $\text{SNR} = 50 \text{ дБ}$  по формуле (11)

$$P_{\text{ПРОМ}} = 3,161 \text{ мВт} = 5 \text{ дБм.}$$

6. Найден коэффициент усиления оптического усилителя по формуле (12)

$$K_{\text{ОУ}} = 5 \text{ дБм} - 4,9 \text{ дБм} + 17,9 \text{ дБ} = 18 \text{ дБ.}$$

7. Определен коэффициент усиления электронного усилителя по формуле (13)

$$K_{\text{ЭУ}} = 20 \text{ дБм} - 2 \text{ дБм} + 2,5 \text{ дБ} = 21,5 \text{ дБ.}$$

8. Вычислен порядок ПФ при требуемом коэффициенте прямоугольности, который при заданных исходных условиях, находится по формулам (15)–(16)

$$K_{\text{П}} \leq \frac{20 \cdot 10^9}{5,7 \cdot 10^9} - 1 = 2,5.$$

Значения времени задержки для различных доп. ВОЛЗ

Номер БВОС $i$	$\tau_{\text{зад}i1}$ , пс	$\tau_{\text{зад}i2}$ , пс	$\tau_{\text{зад}i}$ , нс
1	127,7	255,4	–
2	110,9	221,8	0,51
3	99,5	199	0,95
4	90,9	181,8	1,35
5	84,3	168,6	1,72
6	78,9	187,8	2,05

4. Произведена оценка потери в оптической части формирователя согласно формуле (10):

Тогда из

$$G^2(f) = \frac{G_0^2}{1 + \left(\frac{f}{f_{\text{ср}}}\right)^{2z}},$$

где  $f_{\text{ср}} = \Delta f/2$ ,  $z = 7$  (при измерении коэффициента прямоугольности по уровню минус 60 дБ).

9. Уточнены параметры формирователя ЛЧМ-сигнала на основе БВОС

Ширина спектра результирующего ЛЧМ-сигнала определяется выражением (17) и составляет при заданных параметрах проектирования  $\Delta f' = 5,89 \text{ ГГц}$ . Центральная частота спектра ЛЧМ-сигнала определяется выражением (18) и составляет при заданных параметрах проектирования  $f'_c = 10,1 \text{ ГГц}$ . Длительность результирующего импульса определяется выражением (19) и составляет при заданных параметрах проектирования  $\tau'_{\text{ЛЧМ}} = 2,2 \text{ нс}$ .

На основе полученных данных была синтезирована модель формирователя ЛЧМ-сигналов и произведено моделирование в среде MATLAB. Форма выходного сигнала и его амплитудный спектр приведены на рис. 5.

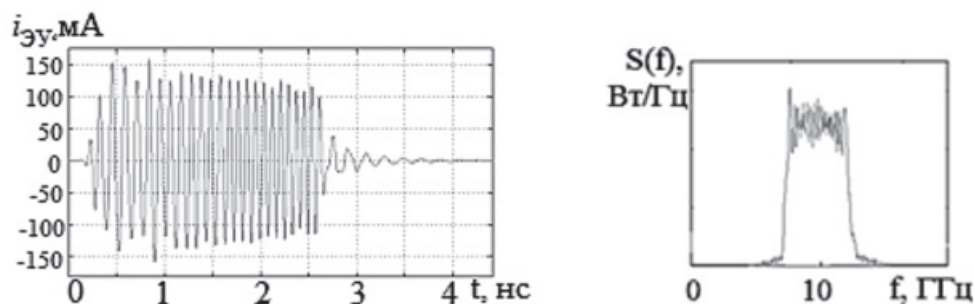


Рис. 5. Форма выходного сигнала (а) и его амплитудный спектр (б)

### Выводы

В статье сформулирована методика проектирования и определения структуры устройства формирования ЛЧМ-сигналов наносекундной длительности по таким параметрам, как длительность формируемого сигнала, требуемая девиация частоты, центральная частота требуемого сигнала, выходная мощность и отношение сигнал/шум на выходе формирователя. Приведен пример проектирования формирователя, моделирование которого в пакете MATLAB подтвердило эффективность предложенной методики. Так, синтезирована структура и определены основные параметры формирователя ЛЧМ-сигналов, позволяющие уменьшить длительность ЛЧМ-сигнала до значения 2,2 нс при девиации частоты ЛЧМ-сигнала  $\Delta f = 5,7$  ГГц, центральной частоте  $f_c = 10$  ГГц, мощности выходного сигнала  $P_{\text{вых}} = 100$  мВт, средней мощности оптического излучения ПОМ  $P_{\text{ПОМ}} = 10$  мкВт и отношении сигнал/шум на выходе формирователя  $\text{SNR} = 50$  дБ. При этом требуемая длительность импульса ПОМ не превышает значения 41 пс, а общие потери мощности сигнала в формирователе не превышают 20,3 дБ.

Измеренная по результатам моделирования длительность сформированного сигнала по уровню  $-3$  дБ составила 2,1 нс, что на 4,5% отличается от значения, предусмотренного проектированием. Мощность выходного сигнала  $P_{\text{вых}} = 0,103$  Вт, что на 2,9% отличается от значения, предусмотренного проектированием.

*Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства образования и науки РФ высшим учебным заведениям в части проведения научно-исследовательских работ. Тема № 213.01-11/2014-9.*

### Список литературы

1. Гоноровский И.С. Радиотехнические цепи и сигналы. – М.: Радио и связь, 1986. – 512 с.

2. Зачиняев Ю.В. Анализ сигнальной и шумовой моделей формирователя ЛЧМ-сигналов на основе волоконно-оптических структур // Теор. и методологические проблемы эффективного функционирования радиотехнических систем: сборник трудов Всероссийской научной конференции (Таганрог, 1 ноября 2013 г.). – Таганрог, 2013. – С. 122–129.

3. Зачиняев Ю.В. Моделирование формирователя ЛЧМ-радиосигналов на основе бинарных волоконно-оптических структур // Фотоника и информационная оптика: сборник трудов III Всероссийской конференции (Москва, 29–31 января 2014 г.). – М., 2014. – С. 91–92.

4. 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.

5. Кукуяшный А.В. Особенности формирования ЛЧМ-сигналов с использованием волоконно-оптических структур // Информационное противодействие терроризму. – 2007. – № 9. – С. 75–88.

### References

1. Gonorovsky I.S. *Radiotekhnicheskie tsepi i signaly* [Radio technical circuits and signals]. Moscow, Radio i Svyazj Publ., 1986. 512 p.

2. Zachinyaev Yu.V. *Sbornik trudov Vserossijskoj nauchnoj konferencii «Teoreticheskie i metodicheskie problemy effektivnogo funkcionirovaniya radiotekhnicheskikh sistem»* (Proc. Int. Scient. Conf. “Theoretical and methodical problems of radio engineering systems effective functioning”). Taganrog, 2013, pp. 122–129.

3. Zachinyaev Yu.V. *Sbornik trudov III Vserossijskoj konferencii «Fotonika i informacionnaja optika»* (Proc. 3th All-rus. Conf. «Photonics and information optics»). Moscow, 2014, pp. 37–38.

4. Zachinyaev Yu.V., Rumjancev K.E., Kukujaashnyj A.V. *Elektrotehnicheskie i informacionnyye sistemy i komplekсы*, 2011, no. 3, pp. 32–38.

5. Kukujaashnyj A.V. *Informacionnoe protivodejstvie terrorizmu*, 2007, no. 9, pp. 75–88.

### 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.

Работа поступила в редакцию 10.10.2014.