

*Чижев А.Л., Микитчук К.Б., Малышев С.А.
ГНПО «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника»
Национальной академии наук Беларуси*

Моделирование передачи сверхширокополосных СВЧ-сигналов с линейно-частотной модуляцией по аналоговым волоконно-оптическим линиям

В статье представлена физико-математическая модель волоконно-оптической линии передачи сверхширокополосных СВЧ-сигналов, учитывающая оптические потери и хроматическую дисперсию в одномодовом оптическом волокне, а также неравномерность амплитудно-частотной и фазо-частотной характеристик электрооптических модуляторов и СВЧ-фотодиодов. С помощью численного моделирования проведено исследование изменения параметров сверхширокополосных СВЧ-сигналов с линейно-частотной модуляцией при их передаче по аналоговым волоконно-оптическим линиям.

Ключевые слова: сверхширокополосный СВЧ-сигнал, линейно-частотная модуляция, аналоговая волоконно-оптическая линия передачи, автокорреляционная функция.

Сверхширокополосная радиолокация дает ряд преимуществ по сравнению с радиолокацией, использующей традиционные узкополосные сигналы, полоса частот которых не превышает 10% от несущей частоты. Повышение информативности радара при использовании сигналов со сверхширокой полосой частот происходит благодаря уменьшению импульсного объема по дальности, в результате чего повышается точность измерения расстояния до цели и разрешающая способность по дальности [1], получается радио-изображение цели [2], повышается устойчивость радара к воздействию пассивных помех [3], повышается вероятность обнаружения и устойчивость сопровождения цели и скрытность работы радара [4]. Следует отметить, что архитектура систем радиолокации при использовании сверхширокополосных сигналов значительно отличается от аналогичной при использовании традиционных узкополосных сигналов [5]. Отличия и особенности проявляются практически во всех подсистемах: в устройствах формирования сверхширокополосного сигнала, его передачи, приема и обработки, что создает трудности при разработке сверхширокополосных радаров. В этом плане перспективным является применение технологий радиофотоники, поскольку использование оптоэлектронных и оптических методов для передачи, генерации и обработки СВЧ-сигналов позволяет создавать устройства и системы СВЧ-диапазона с параметрами, недостижимыми традиционными электронными средствами. В данной работе с помощью численного моделирования проведено исследование изменения параметров сверхширокополосных СВЧ-сигналов с линейно-частотной модуляцией (ЛЧМ) при их передаче по аналоговым волоконно-оптическим линиям.

На рис. 1 приведена структурная схема волоконно-оптической линии передачи сверхширокополосных СВЧ-сигналов. С помощью волоконно-оптического лазерного модуля, в котором непрерывное излучение лазера модулируется по интенсивности с помощью электрооптического модулятора Маха-Цендера, сверхширокополосный СВЧ-сигнал преобразуется в модулированный по интенсивности оптический сигнал, который

распространяется по оптическому волокну. Обратное оптоэлектронное преобразование осуществляется с помощью детектирования модулированного оптического сигнала с помощью СВЧ-фотодиода.

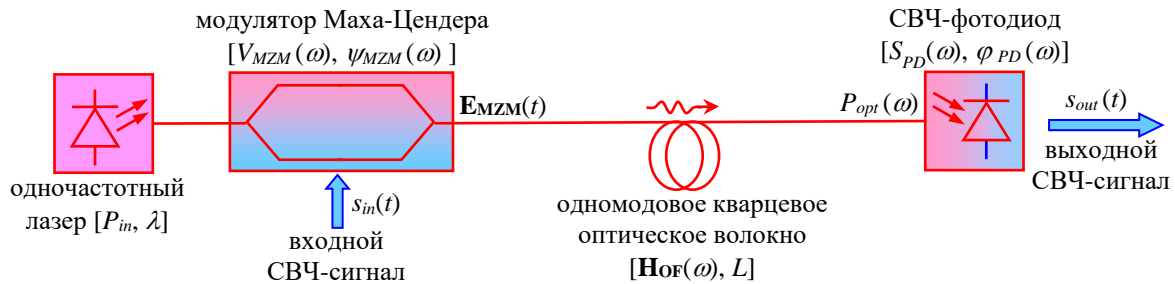


Рис. 1. Структурная схема волоконно-оптической линии передачи сверхширокополосных СВЧ-сигналов

Метод комплексных медленноменяющихся амплитуд применим к описанию волоконно-оптической линии передачи сверхширокополосных СВЧ-сигналов в силу того, что процессы в ней характеризуются различными более чем на порядок масштабами времени оптической несущей и сверхширокополосного СВЧ-сигнала, величина полосы частот которого не превышает 0.5% от частоты оптического сигнала. При построении волоконно-оптической линии для передачи сверхширокополосных СВЧ-сигналов необходимо учесть, что выходной сигнал СВЧ-фотодиода пропорционален интенсивности оптического сигнала, которая в свою очередь пропорциональна квадрату электрического поля, причем величина электрического поля рассчитывается как действительная часть комплексной амплитуды поля – по этой причине все линейные операции удобно проводить с комплексными амплитудами, а перед расчетом спектральной плотности мощности возвращаться к величине электрического поля.

Следует отметить, что при реализации физико-математической модели в виде компьютерной программы быстрое преобразование Фурье обладает более высокой вычислительной эффективностью по сравнению с дискретной сверткой, по этой причине некоторые линейные операции (например, фильтрацию) эффективнее производить в частотной области, а некоторые (например, модуляцию оптической несущей сложным СВЧ-сигналом) во временной. Выражение для комплексной амплитуды электрического поля на выходе модулятора Маха–Цендера имеет следующий вид [6]:

$$\mathbf{E}_{MZM}(t) = \sqrt{P_{in} T_{MZM}} \left[e^{i\varphi_{MZM}} e^{i\varphi_m(t)} + 1 \right] / 2, \quad (1)$$

где P_{in} – мощность лазерного излучения на входе модулятора Маха–Цендера,

T_{MZM} – оптические потери, вносимые модулятором Маха–Цендера;

φ_{MZM} – фаза смещения модулятора Маха–Цендера,

$\varphi_m(t)$ – сдвиг фаз между плечами модулятора Маха–Цендера, который создается сверхширокополосным СВЧ-сигналом с зависимостью напряжения от времени $s_{in}(t)$:

$$\varphi_m(t) = \mathbb{F}^{-1} \left\{ \pi \mathbb{F} \{ s_{in}(t) \} / V_{MZM}(\omega) + \psi_{MZM}(\omega) \right\}, \quad (2)$$

где $\mathbb{F}, \mathbb{F}^{-1}$ – операторы прямого и обратного преобразования Фурье;

$V_{MZM}(\omega)$ – амплитудно-частотная характеристика полуволнового напряжения модулятора Маха–Цендера;

$\psi_{MZM}(\omega)$ – фазо-частотная характеристика модулятора Маха–Цендера.

Оптическое волокно с ненулевой дисперсией эквивалентно фильтру с комплексным откликом $\mathbf{H}_{of}(\omega)$ с линейной зависимостью групповой задержки от частоты [7], тогда выражение для оптической мощности на входе СВЧ-фотодиода имеет следующий вид:

$$P_{opt}(\omega) = |\mathbf{H}_{OF}(\omega) \mathbb{F}\{\mathbf{E}_{MZM}(t)\}|^2, \quad \mathbf{H}_{OF}(\omega) = e^{-(\alpha_{OF} + jD_{OF}\omega^2\lambda^2/4\pi c)L} \quad (3)$$

где α_{OF} – коэффициент затухания в оптическом волокне;

D_{OF} – коэффициент хроматической дисперсии в оптическом волокне;

λ – длина волны генерации лазера;

L – длина отрезка оптического волокна.

Оптоэлектронное преобразование в СВЧ-фотодиоде описывается следующим соотношением:

$$\mathbf{I}_{PD}(\omega) = S_{PD}(\omega) e^{j\varphi_{PD}(\omega)} P_{opt}(\omega), \quad s_{out}(t) = \mathbb{F}^{-1}\{\mathbf{I}_{PD}(\omega) R_{PD}\}, \quad (4)$$

$S_{PD}(\omega), \varphi_{PD}(\omega)$ – амплитудно-частотная и фазо-частотная характеристика токовой чувствительности СВЧ-фотодиода;

R_{PD} – сопротивление нагрузки СВЧ-фотодиода (обычно 50 Ом);

$s_{out}(t)$ – СВЧ-сигнал на выходе волоконно-оптической линии.

Следует отметить, что возможность применения сверхширокополосного СВЧ-сигнала в современных системах радиолокации определяется, в первую очередь, параметрами его автокорреляционной функции: шириной главного лепестка и уровнем боковых лепестков. Нормированная автокорреляционная функция $r(\tau)$ СВЧ-сигнала на выходе волоконно-оптической линии рассчитывается следующим образом:

$$r(\tau) = R(\tau) / R(0), \quad R(\tau) = \mathbb{F}^{-1}\left\{\left|\mathbb{F}\{s_{out}(t)\}\right|^2\right\} = \mathbb{F}^{-1}\left\{|\mathbf{I}_{PD}(\omega)|^2\right\} R_{PD}^2, \quad (5)$$

С помощью численного расчета автокорреляционной функции исследовалось влияние неравномерности амплитудно-частотной и фазо-частотной характеристики фотодиода на параметры автокорреляционной функции. На рис. 3 показана зависимость ширины огибающей главного лепестка автокорреляционной функции сверхширокополосного СВЧ-сигнала с частотно-временной базой 10^4 от величины неравномерности амплитудно-частотной характеристики фотодиода. При моделировании считалось, что частотная характеристика СВЧ-фотодиода является лоренцевским контуром первого порядка, центральная частота которого совпадает с центральной частотой сверхширокополосного СВЧ-сигнала, а неравномерность определяется полной шириной на полувысоте. Видно, что неравномерность амплитудно-частотной характеристики фотодиода до величины 3 дБ во всей полосе ЛЧМ-сигнала приводит к уширению главного лепестка автокорреляционной функции не более чем на 50%.



Рис. 3. Зависимость ширины огибающей главного лепестка автокорреляционной функции ЛЧМ-сигнала с полосой 10 ГГц и частотно-временной базой 10^4 от величины неравномерности амплитудно-частотной характеристики фотодиода

Из-за дисперсии в оптическом волокне нарушается детерминированная связь между фазами составляющих модулированного по интенсивности оптического сигнала. На рис. 4 приведены автокорреляционные функции сверхширокополосных ЛЧМ-сигналов с полосой 10 ГГц, центральной частотой 37 ГГц и частотно-временной базой 10^4 после распространения по волоконно-оптической линии различной длины. Из рисунка видно, что из-за влияния дисперсии увеличивается как ширина главного лепестка, так и уровень боковых лепестков автокорреляционной функции передаваемого сигнала.

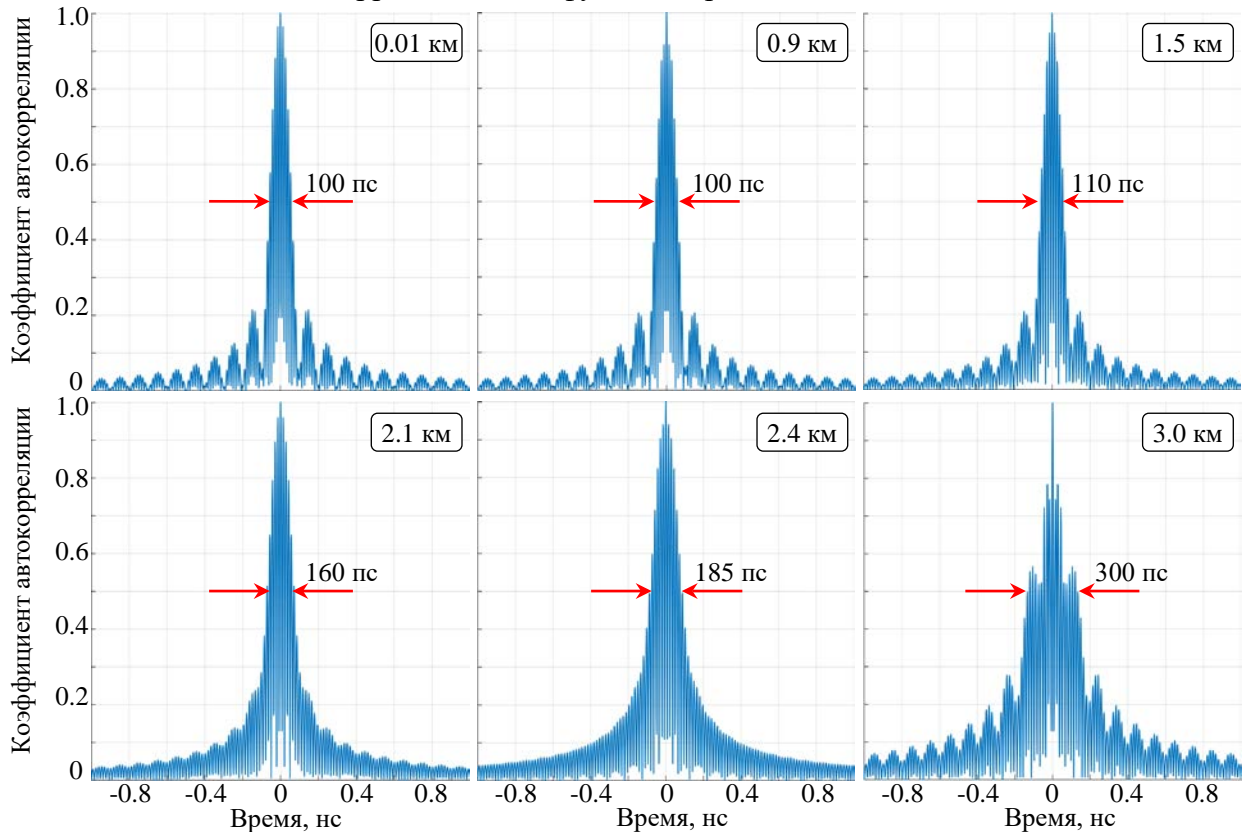


Рис. 4. Изменение автокорреляционной функции ЛЧМ-сигнала с полосой 10 ГГц, центральной частотой 37 ГГц и частотно-временной базой 10^4 после передачи по аналоговым волоконно-оптическим линиям различной длины

На рис. 5 показана зависимость ширины огибающей главного лепестка автокорреляционной функции ЛЧМ-сигнала с полосой 10 ГГц и частотно-временной базой 10^4 от длины волоконно-оптической линии для различных значений центральной частоты. Из рисунка видно, что при увеличении длины оптического волокна ширина главного лепестка автокорреляционной функции ЛЧМ-сигнала начинает увеличиваться с некоторого порогового расстояния передачи, причем с увеличением центральной частоты ЛЧМ-сигнала пороговое расстояние уменьшается. В частности, при передаче сверхширокополосных ЛЧМ-сигналов с полосой частот 10 ГГц и центральной частотой 7 ГГц по волоконно-оптической линии на расстояние до 10 км ширина главного лепестка автокорреляционной функции не изменяется более, чем на 5%. Напротив, для случая передачи сверхширокополосного ЛЧМ-сигнала с полосой частот 10 ГГц и центральной частотой 37 ГГц ширина главного лепестка увеличивается на более чем 10% для расстояния передачи свыше 1.7 км.

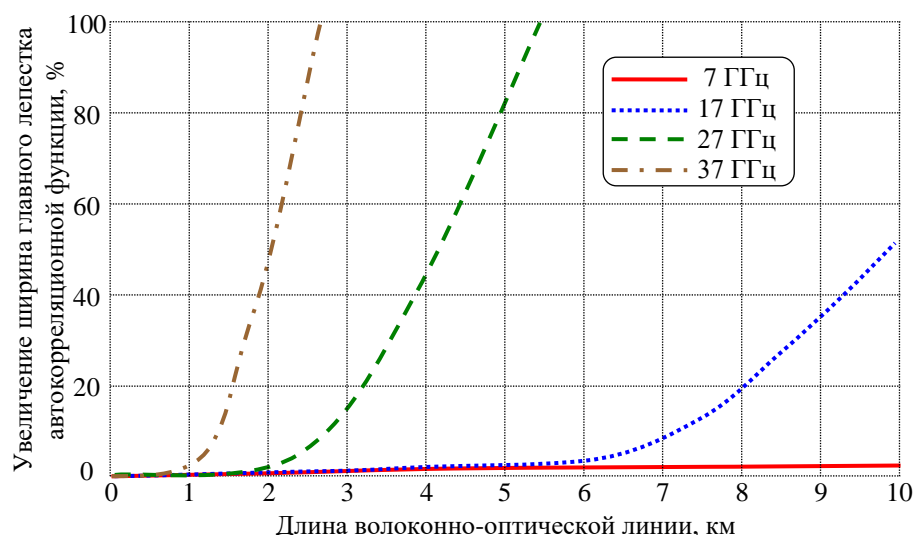


Рис. 5. Зависимость ширины огибающей главного лепестка автокорреляционной функции ЛЧМ-сигнала с полосой 10 ГГц и частотно-временной базой 10^4 от длины волоконно-оптической линии для различных значений центральной частоты

Таким образом, разработана физико-математическая модель передачи оптических сигналов, модулированных по интенсивности сверхширокополосными СВЧ-сигналами с большой частотно-временной базой, учитывающая оптические потери и хроматическую дисперсию в одномодовом оптическом волокне, а также неравномерность амплитудно-частотной и фазо-частотной характеристик электрооптических модуляторов и СВЧ-фотодиодов. Показано, что неравномерность частотных характеристик СВЧ-фотодиодов, а также хроматическая дисперсия в оптическом волокне приводит к незначительному ухудшению разрешающей способности систем сверхширокополосной радиолокации при использовании оптических методов передачи зондирующих сигналов на расстояния меньше 1 км.

Библиографический список

1. Real-time noncoherent UWB positioning radar with millimeter range accuracy: Theory and experiment / C. Zhang, M.J. Kuhn, B.C. Merkl, A.E. Fathy and M. R. Mahfouz // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. – 2010. – V. 58, no. 1. – pp. 9-20.
2. Ultra-wideband radar noise reduction for target classification / S. Hantscher, A. Reizenzahn and C. G. Diskus // IET Radar, Sonar & Navigation. – 2008. – V. 2, no. 4. – pp. 315-322.
3. Time-frequency transforms for radar imaging and signal analysis / Victor C. Chen, Hao Ling // Artech House, 2002. – 234 p.
4. Ultra-wideband multifunctional communications/radar system / G. N. Saddik, R. S. Singh and E. R. Brown // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. – 2007. – V. 55, no. 7. – pp. 1431-1437.
5. Radar Signals / N. Levanon, E. Mozeson // Wiley-IEEE Press, 2004. – 432 p.
6. Fundamentals of microwave photonics / V.J. Urick, K.J. Williams, J.D. McKinney // Hoboken: Wiley, 2015. – 488 p.
7. Chromatic dispersion in fiber-optic microwave and millimeter-wave links / U. Gliese, S. Nprskov, and T. N. Nielsen // IEEE Transactions on microwave theory and techniques. – 1996. – V. 44, no. 10. - pp. 1716-1724.