

Оптоэлектронная демодуляция радиолокационных сверхширокополосных сигналов

К.Б. Микитчук, А.Л. Чиж

Лаборатория радиофотоники ГНПО «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника» НАН Беларуси

Аннотация: в данной работе представлены результаты теоретического и экспериментального исследования метода оптоэлектронной демодуляции сверхширокополосных радиолокационных СВЧ-сигналов с линейно-частотной модуляцией. Теоретически обоснована возможность понижения частоты и сжатия частотного диапазона таких сигналов на основе электрооптических модуляторов Маха-Цендера при использовании реплики зондирующего сигнала в качестве опорного. Экспериментально продемонстрирована демодуляция СВЧ-сигнала с линейно-частотной модуляцией в диапазоне 0 – 4.8 ГГц для имитируемой временной задержки до исследуемого объекта 1.5 и 3 нс.

Ключевые слова: демодуляция радиолокационных сигналов, сверхширокополосный СВЧ-сигнал с линейно-частотной модуляцией, сжатие частотного диапазона, понижение частоты

1. Введение

Современные радары имеют возможность обнаруживать объекты независимо от погодных условий, причем под термином «обнаружение» понимается быстрое измерение координат объекта как единого целого в режиме, близком к реальному времени, однако при этом отсутствует возможность построения радиоизображения объекта. В последние годы отмечается тенденция к значительному увеличению спроса на многофункциональные широкополосные системы радиолокационного наблюдения, обеспечивающие выдачу многоуровневых данных об объекте вплоть до построения радиоизображений [1]. Один из наиболее перспективных методов увеличения пространственного разрешения заключается в использовании сверхширокополосных СВЧ-сигналов, так как разрешение радара обратно пропорционально ширине полосы частот зондирующего сигнала и может быть менее 10 см для сложных нестационарных сигналов длительностью свыше 1 нс и внутренней частотной модуляцией в полосе частот в несколько гигагерц [2].

Практическая реализация сверхширокополосных радаров с высоким пространственным разрешением в настоящее время осложнена требованиями как к устройствам формирования, так и к устройствам обработки сверхширокополосных СВЧ-сигналов [3]. Например, для построения изображений движущихся целей разных классов необходима обработка большого объема радиолокационных данных в сверхширокой полосе частот, что сопряжено с необходимостью использования огромных вычислительных мощностей. Сверхширокополосные устройства обработки традиционно строятся на элементной базе СВЧ-техники, для которой характерны ограниченная полоса пропускания, большой вес и энергопотребление [1]. Радиофотоника позволяет ослабить влияние данных ограничений, так как из-за огромной разницы между временными/частотными масштабами оптической несущей (~200 ТГц) и модуляционной СВЧ-составляющей (~1÷100 ГГц) в радиофотонных устройствах любой модулированный оптический сигнал является узкополосным с точки зрения оптической системы. Оптическое волокно и волоконно-оптические компоненты характеризуются уникальными свойствами, которые не имеют аналогов в электронике: сверхнизкие потери, невосприимчивость к электромагнитным помехам

СВЧ-диапазона и полная гальваническая развязка.

Ранее авторами было создано радиопотонное устройство для генерации сверхширокополосных СВЧ-сигналов с частотной модуляцией для современных и перспективных систем радиолокации, построенное на основе метода самогетеродинирования излучения лазерного диода с помощью волоконно-оптического интерферометра Майкельсона с зеркалами Фарадея [4,5]. В данной работе представлены результаты теоретического и экспериментального исследования метода оптоэлектронной демодуляции радиолокационных сигналов с частотной модуляцией на основе электрооптического модулятора Маха-Цендера.

2. Оптоэлектронный узел демодуляции сверхширокополосных СВЧ-сигналов

На рисунке 1 приведена схема оптоэлектронного узла демодуляции в составе радиопотонной системы генерации и обработки радиолокационных СВЧ-сигналов с линейно-частотной модуляцией. Радиопотонный генератор формирует сигнал с линейно-частотной модуляцией, который после отражения от анализируемого объекта возвращается в оптоэлектронный узел демодуляции сверхширокополосных СВЧ-сигналов и суммируется со своей репликой в пассивном СВЧ-сумматоре. Сумма опорного сверхширокополосного СВЧ-сигнала и анализируемого сигналов подается на СВЧ-вход модулятора Маха-Цендера. В этом случае комплексная амплитуда огибающей поля на выходе модулятора Маха-Цендера определяется как:

$$\mathbf{E}_{MZM}(t) = \alpha \left[\gamma e^{j\varphi(t)} e^{j\varphi_{MZM}} - 1 \right] \mathbf{E}_{opt}(t), \quad \gamma = \frac{\sqrt{\eta} + 1}{\sqrt{\eta} - 1} \quad (1)$$

где $\mathbf{E}_{opt}(t)$ – комплексная амплитуда поля оптической несущей от лазерного диода, α – коэффициент потерь модулятора по полю, η – коэффициент контрастности модулятора, $\varphi(t) = \pi s_{in}(t)/V_{\pi}$ – фаза модуляции, которая записана в пренебрежении частотной характеристикой модулятора, сформированная вследствие воздействия произвольного СВЧ-сигнала $s_{in}(t)$.

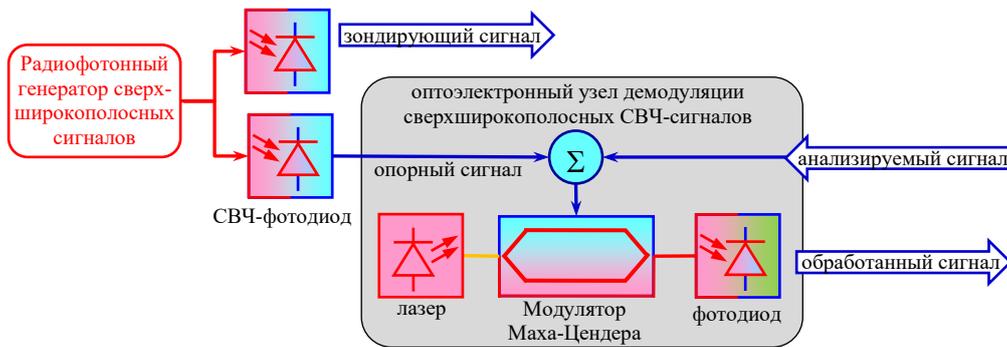


Рисунок 1. Схема оптоэлектронного узла демодуляции в составе радиопотонной системы генерации и обработки радиолокационных СВЧ-сигналов

Когда на вход модулятора подается сумма принятого $s_{echo}(t)$ и опорного $s_{ref}(t)$ сигналов с линейно-частотной модуляцией, то при учете разложения Якоби-Ангера комплексная амплитуда огибающей поля на его выходе может быть записана в следующем виде:

$$\mathbf{E}_{MZM}(t) = \alpha \mathbf{E}_{opt}(t) \left[-1 + \gamma e^{j\varphi_{MZM}} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \sum_{m=-\infty}^{\infty} e^{j(n+m)\pi/2} \times \right. \\ \left. \times J_n(\pi V_{ref} / V_{\pi}) J_m(\pi V_{echo} / V_{\pi}) e^{jn(2\pi f_0 t + \pi k t^2)} e^{jm[2\pi f_0(t-\tau) + \pi k(t-\tau)^2]} \right], \quad (2)$$

где $s_{ref}(t)=V_{ref}\cos(2\pi f_0 t+\pi k t^2)$ – опорный СВЧ-сигнал с линейно-частотной модуляцией в диапазоне частот от f_0 до f_0+B , $s_{echo}(t)=V_{echo}\cos[2\pi f_0(t-\tau)+\pi k(t-\tau)^2]$ – принятый радиолокационный сигнал, информация в котором содержится во флуктуациях длительности задержки τ , $k=2B/T$ – скорость изменения частоты в ширине полосы B с длительностью T , V_{echo} , V_{ref} – амплитуда принятого и опорного сигналов соответственно.

Фотодиод регистрирует только интенсивность оптического сигнала, и, если пренебречь его частотной характеристикой, выходной сигнал принимает вид:

$$s_{out}(t) = \text{const}_1 - \text{const}_2 \sum_{n=-\infty}^{\infty} \sum_{m=-\infty}^{\infty} J_n(\pi V_{ref}/V_\pi) J_m(\pi V_{echo}/V_\pi) \times \\ \times \cos\left(2\pi f_0[nt+m(t-\tau)] + \pi k[nt^2+m(t-\tau)^2] + (n+m)\pi/2\right) + \\ + \text{const}_3 \sum_{n=-\infty}^{\infty} \sum_{m=-\infty}^{\infty} J_n(\pi V_{ref}/V_\pi) J_m(\pi V_{echo}/V_\pi) \times \\ \times \sin\left(2\pi f_0[nt+m(t-\tau)] + \pi k[nt^2+m(t-\tau)^2] + (n+m)\pi/2\right). \quad (3)$$

Как видно из формул (2), (3), электрооптический отклик модулятора Маха-Цендера линеен по фазе и не линеен по амплитуде, по этой причине на выходе оптоэлектронного узла демодуляции сверхширокополосных СВЧ-сигналов формируется целый ряд комбинационных составляющих. Для достижения сжатия частотного диапазона с понижением частоты, то есть демодуляции анализируемого сверхширокополосного СВЧ-сигнала, необходимо учесть члены рядов (3) с наиболее низкой частотой, что достигается в случае $m = -n = 1$:

$$s_{out,LF}(t) \sim \cos \varphi_{MZM} J_1(\pi V_{ref}/V_\pi) J_1(\pi V_{echo}/V_\pi) \cos[\varphi_0 - (4\pi B\tau/T)t], \varphi_0 = \pi k\tau^2 - 2\pi f_0\tau. \quad (4)$$

Из последнего выражения видно, что в данном случае оказывается возможно понижение частоты, так как частота $f_{eff} = 2B\tau/T$ для типичных значений параметров сверхширокополосных СВЧ-сигналов с линейно-частотной модуляцией оказывается значительно ниже центральной частоты СВЧ-сигнала $f_0 + B/2$. Значение частоты f_{eff} не зависит от центральной частоты зондирующего сверхширокополосного сигнала $f_0 + B/2$, а определяется только шириной полосы частот B . Следует отметить, что ширина полосы частот после демодуляции определяется динамикой движения исследуемого объекта, а также его размерами.

Таким образом, при использовании реплики зондирующего сигнала в качестве опорного возможна реализация гомодинного приема с одновременным понижением частоты и сжатием частотного диапазона в электрооптических модуляторах Маха-Цендера, что позволяет демодулировать сверхширокополосные радиолокационные сигналы после отражения от исследуемого объекта и формировать данные для построения радиолокационного изображения с помощью коммерческих доступных стандартных аналогово-цифровых преобразователей и вычислительных комплексов с производительностью на уровне персонального компьютера.

3. Частотно-временные распределения сигналов в оптоэлектронном узле демодуляции радиолокационных сигналов

В радиофотонной системе генерации и обработки радиолокационных СВЧ-сигналов возможно реализовать задержку зондирующего сигнала непосредственно после радиофотонного генератора, соединив выход с зондирующим сигналом со входом анализируемого сигнала в оптоэлектронном узле демодуляции с помощью длинного отрезка одномодового оптического волокна, имитирующую задержку до

исследуемого объекта. Для этих целей в экспериментах использовались отрезки оптического волокна длиной 300 м ($\tau \approx 1.5$ мкс) и 600 м ($\tau \approx 3$ мкс). В соответствии с формулой (4) значение частоты анализируемого сигнала f_{eff} не превышает 200 МГц, поэтому оказывается возможно использовать частотно-временные распределения для анализа в общем случае нестационарных сигналов на выходе оптоэлектронного узла.

В экспериментах сигнал на выходе оптоэлектронного узла демодуляции дискретизируется и собирается с помощью цифрового осциллографа с полосой пропускания 5 ГГц, частотой выборок 25 Гвыб./с и разрешением 8 бит. Затем численно рассчитывается частотно-временное распределение данного СВЧ-сигнала, что позволяет анализировать произвольные сигналы с изменяющейся во времени частотой и одновременно представляет сигнал во временной и в частотной областях. В качестве математического инструмента выбрано преобразование Фурье с синхронным сжатием, поскольку для нестационарных сигналов с плавно изменяющейся частотой оно генерирует наиболее четкие частотно-временные оценки [6]. В качестве зондирующего сигнала использовался сверхширокополосный СВЧ-сигнал с линейно-частотной модуляцией от 0 до 4.8 ГГц при полной длительности сигнала с треугольной формой изменения частоты $T = 140$ мкс [4,5]. На рисунке 2 приведено частотно-временное распределение сигнала, измеренного на выходе СВЧ-сумматора и выходе оптоэлектронного узла демодуляции сверхширокополосных СВЧ-сигналов. Видно, что после СВЧ-сумматора формируется линейная суперпозиция сигналов, задержка между которыми составляет $\tau = 1.5$ мкс, что соответствует использованному отрезку оптического волокна, причем из-за линейного суммирования между ними не наблюдается взаимодействия. На выходе оптоэлектронного узла демодуляции виден основной тон зондирующего СВЧ-сигнала, при этом из-за нелинейности модулятора Маха-Цендера формируются кратные и комбинационные гармоники от суперпозиции сигналов на входе модулятора Маха-Цендера. В случае, если на вход модулятора Маха-Цендера не подается сумма сигналов, то на выходе всего радиофотонного узла демодуляции не формируется стационарных низкочастотных составляющих.

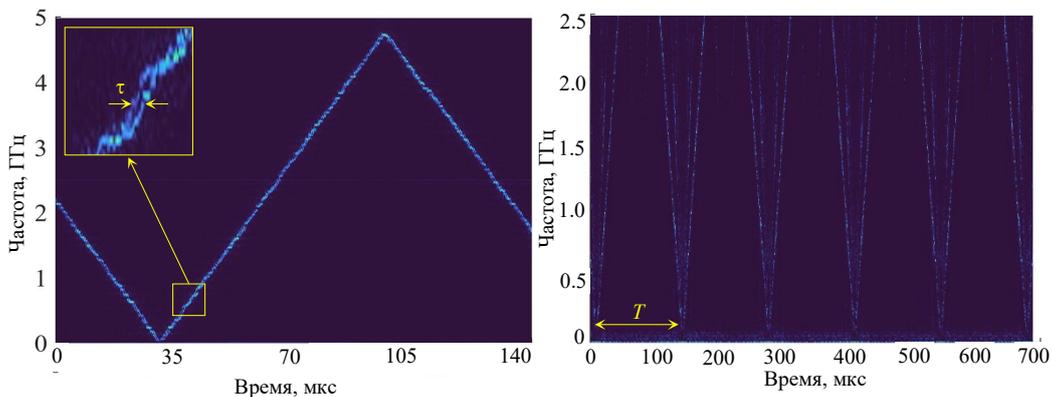


Рисунок 2. Частотно-временное распределение сигнала, измеренного на выходе СВЧ-сумматора (слева) и выходе оптоэлектронного узла демодуляции сверхширокополосных СВЧ-сигналов (справа)

На рисунке 3 приведено частотно-временное распределение низкочастотной составляющей сигнала, измеренного на выходе оптоэлектронного узла демодуляции сверхширокополосных СВЧ-сигналов при подаче опорного и анализируемого сигналов, временная задержка между которыми составляет 1.5 и 3 мкс. Видно, что в эксперименте достигается гомодинное понижение частоты зондирующего сигнала, причем в соответствии с формулой (4) величина «основной» пониженной частоты

пропорциональна длительности задержки, которая имитирует дальность до исследуемого объекта.

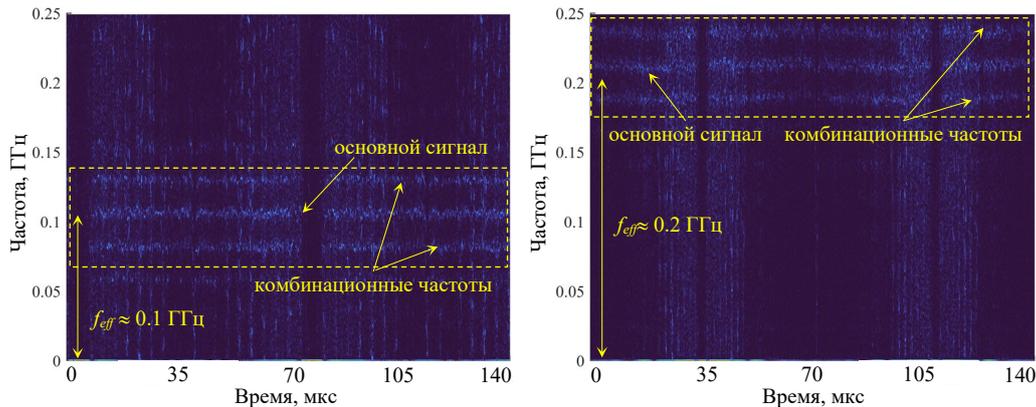


Рисунок 3. Частотно-временное распределение низкочастотной составляющей сигнала, измеренного на выходе оптоэлектронного узла демодуляции сверхширокополосных СВЧ-сигналов при подаче опорного и анализируемого сигналов, временная задержка между которыми составляет 1.5 мкс (слева) и 3.0 мкс (справа)

4. Заключение

В работе теоретически обоснована возможность демодуляции сверхширокополосного радиолокационного СВЧ-сигнала с линейно-частотной модуляцией на основе электрооптического модулятора Маха-Цендера при использовании реплики зондирующего сигнала в качестве опорного. Экспериментально продемонстрирована демодуляция СВЧ-сигнала с линейно-частотной модуляцией в диапазоне 0 – 4.8 ГГц для имитируемой временной задержки 1.5 и 3 мкс, при этом частота обработанного сигнала после демодуляции составила соответственно 100 и 200 МГц. Это позволяет использовать такой метод демодуляции в перспективных системах радиолокационного наблюдения, обеспечивающих выдачу многоуровневых данных об объекте вплоть до построения радиоизображений.

Список литературы

1. Chen V., Martorella M. Inverse synthetic aperture radar imaging. Principles, algorithms and applications // SciTech Publishing, 2014. – 420 p.
2. Photonics in radar systems / P. Ghelfi et al // IEEE Microw. Mag. – 2015. – Vol. 16, № 8. – P. 74-83.
3. Taylor J.D. Advanced ultrawideband radar: signals, targets, and applications // CRC Press, 2017 – 494 p.
4. Self-heterodyne generation of ultrawideband linear frequency modulated microwave signals based on Michelson interferometer / K. Mikitchuk, A. Chizh, A. Lebedev // Proc. of IEEE 8th All-Russian Microwave Conference. – 2022. – P. 1-4.
5. Радиофотонные модули для генерации сверхширокополосных СВЧ-сигналов и методы формирования сигналов с линейно-частотной модуляцией на их основе / К.Б. Микитчук, А.С. Лебедев, А.Л. Чиж // Тр. 12-й Всероссийской конференции «Электроника и микроэлектроника СВЧ», Санкт-Петербург. – 2023. – С. 325-329.
6. The Fourier-based synchrosqueezing transform / T. Oberlin, M. Sylvain, V. Perrier // Proc. of IEEE Int. Conf. on acoustics, speech, and signal processing. – 2014. – P. 315-319.