

К. А. Вытовтов

Днепропетровский национальный университет имени О. Гончара

72, пр. Гагарина, Днепропетровск, 49010, Украина

E-mail: vytovtov_konstan@mail.ru

ЧАСТОТНЫЙ ДЕТЕКТОР ОПТИЧЕСКОГО ДИАПАЗОНА НА ИЗОТРОПНОЙ СТРУКТУРЕ

Хорошо известно, что системы связи с частотной модуляцией обладают лучшей помехозащищенностью в сравнении с широко распространенными системами с амплитудной модуляцией. Но несмотря на их широкое использование в радиочастотном диапазоне, в оптическом диапазоне таких систем вообще нет. Одной из причин является отсутствие частотных детекторов указанного диапазона. В данной работе впервые представлены частотные детекторы ближнего инфракрасного диапазона (850 нм) на основе слоистой изотропной структуры. Описан принцип действия и рассчитаны основные технические параметры устройств. В данных устройствах детектирование проводится в два этапа: на первом этапе изменение частоты преобразуется в изменение амплитуды, на втором проводится детектирование амплитудно-модулированного колебания обычными амплитудными детекторами. Здесь рассмотрены три возможных вида детекторов: синфазный, инверсный, балансный. Указаны достоинства и недостатки устройств, а также описаны перспективы их применения в системах связи. Полученные результаты могут быть использованы при разработке оптических систем связи с частотной модуляцией. Ил. 6. Библиогр.: 9 назв.

Ключевые слова: частотный детектор, частотная модуляция, оптический диапазон.

Быстрое развитие и широкое использование современных оптических систем связи определило повышение эффективности обработки сигналов как одну из наиболее актуальных задач. Применяемые методы модуляции сигналов в этой связи имеют большое значение. На сегодняшний день во всех существующих системах рассматриваемого диапазона используются только разнообразные виды амплитудной модуляции [1, 2]. Амплитудная модуляция, как аналоговая, так и цифровая, имеет ряд важных достоинств, обуславливающих ее широкое применение в телекоммуникационных системах. К ним, в частности, относится простота построения приемников. Однако одним из ее серьезных недостатков является то, что влияние помех и изменение уровней передачи в канале приводят к существенным искажениям амплитуды (для цифрового сигнала значащей позиции) сигнала и, следовательно, к снижению его помехозащищенности [3, 4]. Кроме того, амплитудная модуляция энергетически невыгодна, поскольку требует большой энергии передаваемого сигнала [4, 5]. Еще одним недостатком амплитудной модуляции является широкая полоса частот, занимаемая модулированным колебанием, она вдвое шире спектра модулирующего сигнала [4, 5].

Эти недостатки существенно уменьшаются при использовании систем с частотной модуляцией [4]. Но, к сожалению, в оптическом диапазоне в настоящее время такие системы вообще не используются. Одной из причин этого, вероятно, можно считать отсутствие частотных детекторов (как СВЧ, так и оптического диапазона). Действительно, на сегодняшний день в научной литературе достаточно широко описаны различные методы частотной модуляции и практически все стадии обработки частотно-модулированных (ЧМ) сигналов оптического диапазона [1, 2],

за исключением демодуляции. Ни одна фирма не представила частотного детектора указанных диапазонов.

В последнее время появилось лишь несколько научных работ [6, 7], описывающих возможность создания этих устройств, и соответственно, возможность разработки СВЧ и оптических систем связи с частотной модуляцией сигнала. В этих работах были описаны устройства на основе анизотропных материалов с использованием эффекта втягивания волны при ее тангенциальном падении. В описанных устройствах для создания анизотропии необходимо дополнительное использование подмагничивающих катушек.

Здесь описан наиболее простой вариант детектора на основе изотропного слоистого материала при нормальном падении волны. В нашем случае, в частности, не нужны дополнительные соленоиды для создания подмагничивающего поля. Кроме того, материалы для описанных здесь детекторов не столь дорогостоящие, как для анизотропных структур. Таким образом, мы предлагаем более простые и дешевые устройства, не уступающие по своим характеристикам анизотропным детекторам. Единственным недостатком можно считать невозможность управления детектором, как, к примеру, в [6, 7] внешним магнитным полем.

Очевидно, что любые новые устройства должны удовлетворять уже существующим параметрам систем связи и требованиям к ним. В частности, для оптоволоконных систем, где в первую очередь могут использоваться предлагаемые детекторы, рабочая длина волны составляет 850 нм. Полоса пропускания канала связи определяется параметрами оптоволокна и длиной канала связи. Так, для одномодового оптоволокна полоса равна 5 ГГц/км, для оптоволокна со сглаженным индексом – 600 МГц/км, для оптоволокон-

на со ступенчатым индексом – 6 МГц/км. Именно с учетом этих параметров и рассчитываются предлагаемые частотные детекторы. Таким образом, рабочая полоса частот детектора должна определяться этими же параметрами.

Нами описан принцип действия детектора, представлены три типа детекторов: прямой, инверсный и балансный, а также определены границы их применимости.

1. Принцип работы детектора. Радиочастотный аналог. Прежде всего отметим, что метод детектирования ЧМ-сигналов, используемый здесь, не является принципиально новым. На сегодняшний день он детально разработан и используется в радиочастотном диапазоне волн [4, 8]. Но в этом диапазоне соответствующие устройства строятся на дискретных элементах – транзисторах, конденсаторах, дросселях и т. д. Однако в СВЧ, а также оптическом диапазоне дискретных элементов не существует, что, вероятно, и вызывает трудности в построении таких устройств на этих частотах.

Детектирование ЧМ-сигнала, в соответствии с используемым методом, проводится в два этапа. На первом этапе ЧМ-колебание преобразуется в амплитудно-модулированное. На втором проводится детектирование этого амплитудно-модулированного сигнала хорошо известными способами [8]. Важно отметить, что сигнал на выходе частотного детектора является одновременно и амплитудно- и частотно-модулированным по закону передаваемого сообщения. Это, безусловно, приводит к расширению спектра сигнала. Однако численные расчеты показывают незначительное влияние этого фактора [7]. Принцип действия такого детектора наглядно иллюстрирует рис. 1. Пусть, для определенности, исходное сообщение является линейно изменяющимся сигналом $a(t) = A_1 t + A_0$ (рис. 1, а), на рис. 1, б представлено соответствующее ему ЧМ-колебание $s_{вх}(t) = S_0 \cos[ma(t)t + \varphi_0]$, поступающее на вход детектора. Здесь m – коэффициент модуляции. Колебание на выходе частотного детектора имеет вид $s_{вых}(t) = S_0 k a(t) \cos[ma(t)t + \varphi_0]$ (рис. 1, в). Его амплитуда и частота изменяются по закону передаваемого сообщения.

В радиочастотном диапазоне для преобразования изменения частоты в изменение амплитуды используется обычный резонансный усилитель [8] или обычный колебательный контур (рис. 2), причем рабочим является линейный участок амплитудно-частотной характеристики выше или ниже резонансной (например, участок Δf). Если частота сигнала на входе устройства изменяется по некоторому закону в пределах рабочего участка (Δf), тогда амплитуда тока также меняется по тому же закону в пределах интервала $[I_{\min}, I_{\max}]$.

На выходе получаем сигнал с амплитудной и частотной модуляцией одновременно.

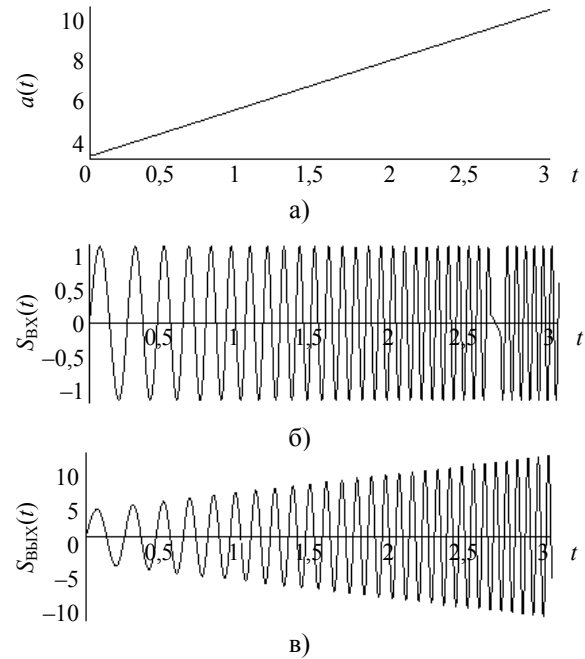


Рис. 1. Этапы детектирования сигнала

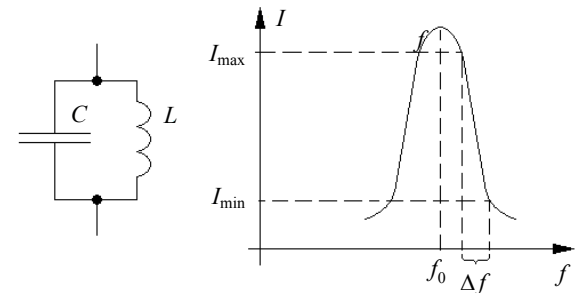


Рис. 2. Частотный детектор радиочастотного диапазона: простейшая схема (а) и амплитудно-частотная характеристика (б)

В оптическом диапазоне подобные участки возможны на амплитудно-частотных характеристиках коэффициентов отражения и прохождения плоскопараллельных структур [6, 7, 9], простейшей из которых является плоскопараллельный однородный слой. Однако эти характеристики достаточно нелинейные, что приводит к значительным искажениям выходного сигнала. Для улучшения линейных свойств (уменьшения нелинейных искажений) предпочтительнее использовать неоднородную и, в частности, слоистую структуру. При этом изменением количества и параметров слоев можно получить практически любую характеристику коэффициента отражения.

Как говорилось ранее, в научной литературе предложен ряд частотных детекторов оптического диапазона [6, 7]. Отличим представляемого устройства на изотропной структуре является прежде всего его простота и низкая себестои-

мость. Действительно, частотные детекторы, описанные в [6, 7], основаны на анизотропных материалах и, соответственно, требуют наличия катушек, создающих подмагничивающее поле. Это в свою очередь требует дополнительных затрат энергии, увеличение веса и усложнение конструкции устройств. Таким образом, применение частотных детекторов на основе изотропных структур является более целесообразным.

Ниже описаны три типа частотных детекторов: синфазный, инверсный и балансный. В синфазном частотном детекторе (разд. 3) фаза изменения амплитуды выходного сигнала соответствует фазе изменения частоты входного сигнала, в инверсном (разд. 2) эти фазы сдвинуты на π . Балансный детектор оптического диапазона и принцип его работы представлен впервые в этой работе (разд. 4). Все они рассчитаны на стандартную длину волны 850 нм, широко используемую в оптоволоконных системах связи. Кроме того, по принципу действия можно различить детекторы, работающие на отражение, и детекторы, работающие на прохождение. В данной работе представлены детекторы, работающие на отражение.

Кроме плоскопараллельных структур, в качестве детектора могут также использоваться все возможные виды резонаторов СВЧ и оптического диапазонов. Независимо от выбора резонансного устройства, важно соблюдение одного необходимого условия: рабочая частота не должна совпадать с резонансной частотой структуры, а должна лежать в пределах линейного участка амплитудно-частотной характеристики. В общем случае для преобразования частоты в амплитуду может использоваться любое устройство с частотной дисперсией.

Отдельной и очень важной задачей является исследование фазочастотной характеристики детектора, поскольку фазовые искажения связаны с задержкой сигнала и так называемым дробовым шумом. Однако эта задача здесь не решается, а является предметом будущих исследований.

2. Инверсный частотный детектор оптического диапазона 850 нм. Данный инверсный частотный детектор представляет собой многослойную изотропную структуру, формально описываемую как $3 (M1 \times M2) \times M3 \times 3 (M1 \times M2)$, где обозначения M1, M2, M3 соответствуют различным изотропным диэлектрическим слоям, т. е. структура включает в себя три двухслойных периода из слоев M1 и M2, затем слой M3, а потом три двухслойных периода из M1 и M2. Параметры слоя M1: $d_1 = 40$ мкм, $\epsilon_1 = 1,2000$; слоя M2: $d_2 = 20$ мкм, $\epsilon_2 = 4,5000$; слоя M3: $d_3 = 30$ мкм, $\epsilon_3 = 2,1538$; $\mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = 1$. Значит, речь идет о слоистой структуре общей толщиной 390 мкм.

В качестве рабочего используется квазилинейный спадающий участок амплитудно-

частотной характеристики коэффициента отражения (рис. 3). В результате амплитуда выходного сигнала изменяется в противофазе с изменением частоты входного сигнала.

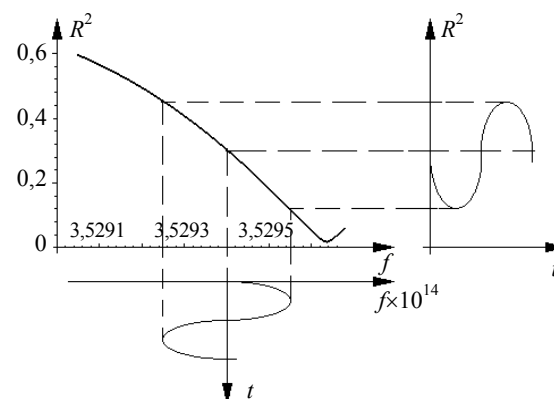


Рис. 3. Амплитудно-частотная характеристика частотного детектора оптического диапазона

Несмотря на то что здесь не ставилась задача выбора конкретных материалов слоев, значения диэлектрических проницаемостей соответствуют реальным. Например, слой M1 может быть бутаном, слой M2 – парафин или бумага, M3 – кварц.

Параметры детектора:

- Коэффициент нелинейности в пределах рабочего участка, вычисленный как $(\text{tg} \alpha_A - \text{tg} \alpha_B) \text{tg} \alpha_A$, равен 0,417 (Вт/ГГц). Отметим, что коэффициент нелинейности здесь вычисляется не как отношение амплитуд гармоник [8] (радиотехнический подход), а как отношение угловых коэффициентов (математический подход). Это связано с тем, что мы характеризуем не сигнал, а способность устройства передавать сигнал без нелинейных искажений.

- Рабочий диапазон частот равен $3,52825 \cdot 10^{14} \dots 3,52855 \cdot 10^{14}$ Гц или $\Delta f = 30$ ГГц.

- Рабочий диапазон коэффициента отражения по мощности равен 0,12...0,44. Данный диапазон является достаточно маленьким, однако он выбран из компромиссных условий. Его увеличение приведет к росту коэффициента нелинейности, а уменьшение – к сокращению дальности канала связи.

- Крутизна амплитудно-частотной характеристики 0,0106 Вт/ГГц. Данная величина также определяется из компромиссных условий. Ее увеличение приводит к уменьшению рабочего диапазона частот и, следовательно, дальности связи, ее уменьшение приводит к снижению чувствительности устройства.

- Выходной сигнал осциллирует в противофазе с входным. Другими словами, увеличение частоты входного сигнала приводит к уменьшению амплитуды выходного сигнала (рис. 3).

3. Синфазный частотный детектор оптического диапазона 850 нм. Представляемый в этом разделе частотный детектор – это многослойная изотропная структура, формально описываемая как $3 (M1 \times M2) \times M3 \times 3 (M1 \times M2)$, где обозначения M1, M2, M3 соответствуют 1, 2 и 3-му изотропным диэлектрическим слоям. Параметры слоев: для слоя M1 $d_1 = 40$ мкм, $\varepsilon_1 = 1,2000$; для слоя M2 $d_2 = 20$ мкм, $\varepsilon_2 = 4,5000$; для слоя M3 $d_3 = 30$ мкм, $\varepsilon_3 = 2,1586$; $\mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = 1$. Общая толщина структуры составляет 390 нм. Расчеты показывают незначительные различия между параметрами слоев синфазного и инверсного детекторов (ε_3 отличается на 0,0048 для указанных двух типов детекторов). Это обстоятельство определяет дополнительные требования к точности изготовления устройств и чистоте материалов.

Амплитудно-частотная характеристика данного детектора представлена на рис. 4. Параметры синфазного детектора:

- Коэффициент нелинейности равен 0,51 Вт/Гцц.
- Полоса пропускания равна $3,52916 \cdot 10^{14} \dots 3,52264 \cdot 10^{14}$ Гц или $\Delta f = 24$ ГГц.
- Рабочий диапазон отражающей способности 0,11...0,61.
- Крутизна амплитудно-частотной характеристики 0,0107 Вт/Гцц.
- Выходной сигнал в фазе с входным. Другими словами, увеличение частоты входного сигнала приводит к увеличению амплитуды выходного сигнала (рис. 4).

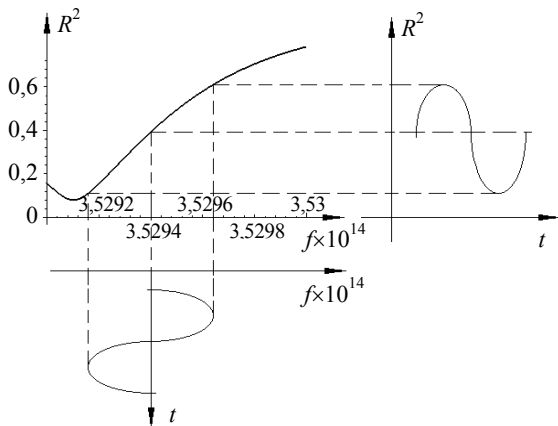


Рис. 4. Амплитудно-частотная характеристика синфазного частотного детектора оптического диапазона

4. Балансный частотный детектор.

Представленные выше детекторы просты в изготовлении и удобны в эксплуатации, однако они имеют ряд недостатков. В частности, эти детекторы имеют достаточно малый рабочий диапазон частот и высокие нелинейные искажения. Для устранения этих недостатков здесь предлагается

использовать так называемый балансный частотный детектор. В этом разделе мы рассмотрим принцип действия такого детектора, а также тестовые расчеты на длины волны 850 нм. Очевидно, что реализация конкретного устройства должна будет определяться требованиями к разрабатываемой системе связи.

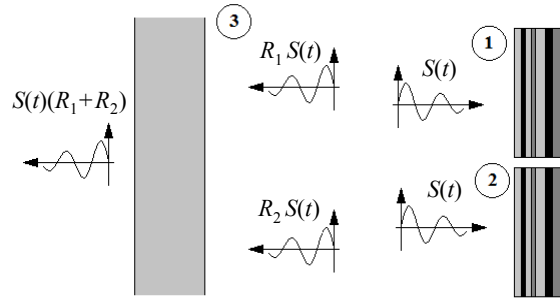


Рис. 4. Принцип действия балансного смесителя

Предлагаемый детектор (рис. 4) включает в себя две слоистые пластины (1 и 2), на которые подаются сигналы с одинаковыми амплитудами и фазами, а также суммирующее устройство 3. Материалы должны быть подобраны таким образом, чтобы один из детекторов был синфазным, второй – инверсным. Важно, что суммирование сигналов, отраженных от пластин 1 и 2, в 3 происходит с учетом фаз сигналов. Амплитудно-частотная характеристика балансного детектора представлена на рис. 5.

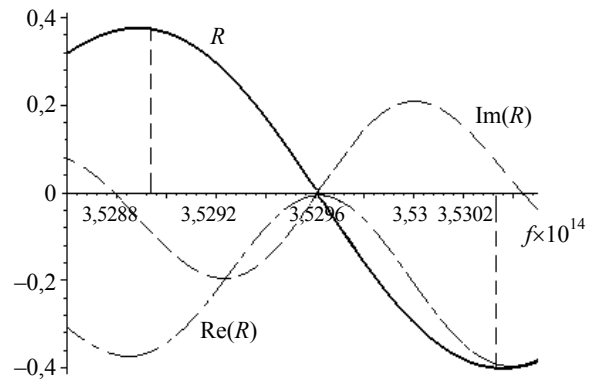


Рис. 5. Амплитудно-частотная характеристика балансного смесителя

Параметры детектора:

- Коэффициент нелинейности равен 0,25 Вт/Гцц.
- Коэффициент нелинейности в диапазоне от $3,5292 \cdot 10^{14}$ до $3,53 \cdot 10^{14}$ приблизительно равен 0.
- Полоса пропускания равна $3,5289 \cdot 10^{14} \dots 3,53 \cdot 10^{14}$ или $\Delta f = 110$ ГГц.
- Рабочий диапазон коэффициента отражения равен 0,4...0,39.

- Крутизна амплитудно-частотной характеристики равна $0,00718 \text{ ГГц}^{-1}$.

5. Анализ результатов и перспективы развития. В данной работе впервые описаны частотные детекторы оптического диапазона на основе изотропных слоистых структур.

Эти детекторы имеют ряд преимуществ в сравнении с предыдущими аналогами на основе анизотропных структур [6, 7]. Кроме того, в работах [6, 7] был описан только принцип детектирования слоистыми анизотропными материалами. Здесь же мы представляем и основные технические характеристики устройств, подтверждающие возможность их практического применения. В частности, их рабочая полоса частот удовлетворяет требованиям к современным оптическим системам связи при использовании различных типов волокон. Так, не рассматривая конкретные марки оптоволокна, но в соответствии с техническими характеристиками, представленными во введении: для одномодового волокна с полосой пропускания 5 ГГц/км длина канала связи должна быть не более $5\text{--}6 \text{ км}$ при использовании прямого или инверсного детекторов и 22 км при использовании балансного детектора; для многомодового волокна со сглаженным индексом (600 МГц/км) – $40\text{--}50 \text{ км}$ для прямого и инверсного детекторов и 180 км при использовании балансного детектора; для оптоволокна со ступенчатым индексом (6 МГц/км) длина канала должна составлять не более $4\ 000\text{--}5\ 000 \text{ км}$ при использовании прямого или инверсного детектора и $18\ 000 \text{ км}$ при использовании балансного детектора.

Коэффициенты нелинейности синфазного и инверсного детекторов достаточно велики для аналоговых сигналов, но при использовании цифровых видов модуляции они не играют существенного значения. Коэффициент нелинейности балансного детектора (разд. 4) существенно ниже при более широком рабочем диапазоне частот, а в диапазоне частот, соответствующем синфазному и инверсному детекторам (разд. 2, 3) практически равен 0.

Конечно же, возможность управления детектором на основе анизотропных материалов посредством внешнего магнитного поля является их преимуществом в сравнении с описанными здесь. Однако, с нашей точки зрения, в большинстве телекоммуникационных систем это приводит к неоправданному усложнению приемников.

Более существенной проблемой для предлагаемых устройств является чувствительность технических параметров детекторов к геометрическим размерам и значению диэлектрической проницаемости слоев, что наглядно видно из рассмотрения синфазного и инверсного детекторов. Этот факт налагает дополнительные требования к точности изготовления устройств и чис-

тоте материалов. Именно в этой связи достоинством анизотропных детекторов является возможность их настройки.

В заключение отметим, что полученные результаты позволяют в дальнейшем перейти к разработке оптических систем связи с частотной модуляцией. Действительно, такие процессы, как генерация, модуляция, фильтрация и т. д., уже описаны в научно-технической литературе. С разработкой частотных детекторов такие системы становятся реальностью.

Библиографический список

1. Слепов Н. Н. Современные технологии цифровых оптоволоконных сетей связи / Н. Н. Слепов. – М.: Радио и связь, 2000. – 468 с.
2. Гауэр Дж. Оптические системы связи / Дж. Гауэр; пер. с англ. под ред. А. И. Ларкина. – М.: Радио и связь: 1988. – 500 с.
3. Князев А. Д. Элементы теории и практики обеспечения электромагнитной совместимости радиоэлектронных средств / А. Д. Князев. – М.: Радио и связь. 1984. – 336 с.
4. Гоноровский И. С. Радиотехнические цепи и сигналы / И. С. Гоноровский. – М.: Сов. радио, 1971. – 672 с.
5. Баскаков С. И. Радиотехнические цепи и сигналы / С. И. Баскаков. – 3-е изд. – М.: Высш. школа, 2000. – 464 с.
6. Vytovtov K. Penetration effect in gyrotropic slab: theory and applications / K. Vytovtov, L. Mospan // J Optical Soc. America A. – 2012. – 29, N 5. – P. 877–882.
7. Вытовтов К. А. Частотный детектор СВЧ-диапазона на основе плоскопараллельной анизотропной структуры / К. А. Вытовтов // Вісник Харків. нац. ун-ту ім. В. Н. Каразіна. Радіофізика та електрон. – 2012. – 20, №10. – С. 73–78.
8. Руденко В. С. Промышленная электроника / В. С. Руденко. – К.: Техника, 1979. – 504 с.
9. Борн М. Основы оптики / М. Борн, Э. Вольф. – М.: Наука, 1973. – 720 с.

Рукопись поступила 22.08.2013.

К. А. Vytovtov

FREQUENCY DETECTOR OF OPTICAL DOMAIN BASED ON ISOTROPIC STRUCTURE

It is well known that the communication system with frequency modulation has better noise immunity in comparison with widespread systems with the amplitude modulation. But despite their widespread use in radio frequency domain, in the optical domain such systems do not exist. One of reasons is the lack of detectors of this frequency range. In this paper, for the first time the near infrared frequency detectors (850 nm) are shown, they are based on a layered isotropic structure. The operation principle is described and the basic technical parameters of the devices are calculated. These devices detection is carried out in two stages: at the first stage the frequency change is converted to a amplitude change; at the second stage, detection of amplitude-modulated oscillation is carried out by usual amplitude detectors. Three possible types of detectors are considered: in-phase, inverse, balance. Advantages and disadvantages of the devices have been shown and their application prospects in communication systems have been described. The results can be used in optical communication systems with frequency modulation.

Key words: frequency detector, frequency modulation, optical domain.

К. А. Витовтов

ЧАСТОТНИЙ ДЕТЕКТОР ОПТИЧНОГО ДІАПАЗОНУ НА ІЗОТРОПНІЙ СТРУКТУРІ

Добре відомо, що системи з частотною модуляцією мають кращу заводо захищеність у порівнянні з поширеними системами з амплітудною модуляцією. Але, не дивлячись на їх широке використання в радіочастотному діапазоні, в оптичному діапазоні таких систем взагалі немає. Однією з причин є відсутність частотних детекторів указанного діапазону. У цій роботі вперше представлено частотні детектори ближнього

інфрачервоного діапазону (850 нм) на основі шаруватої ізотропної структури. Описано принцип дії та розраховано основні технічні параметри пристроїв. У цих пристроях детектування проводиться в два етапи: на першому етапі зміна частоти перетворюється у зміну амплітуди, на другому проводиться детектування амплітудно-модульованого коливання звичайними амплітудними детекторами. Тут розглянуто три можливі види детекторів: синфазний, інверсний, балансний. Вказано переваги та недоліки пристроїв, а також перспективи їх використання в системах зв'язку. Отримані результати можуть бути використані при розробці оптичних систем з частотною модуляцією.

Ключові слова: частотний детектор, частотна модуляція, оптичний діапазон.