

УДК 531.715:681.327

Оценка погрешностей измерения амплитуды и фазы спектральных составляющих радиосигналов при использовании лазерных спектроанализаторов

Титов А. А.¹, Гарипов В. К.^{1,*},
Костромин М. А.¹

* garvad11@gmail.com

¹Московский государственный университет информационных технологий, радиотехники и электроники, Москва, Россия

В статье рассмотрены вопросы оценки погрешностей измерения при использовании лазерных спектроанализаторов. Определено, что в настоящее время оптические методы находят все большее распространение при спектральном анализе радиосигналов. Показана возможность производить спектральный анализ как амплитуды, так и фазы частотных составляющих сигналов и осуществление для анализа фазы частотных составляющих радиосигналов интерференционных методов измерений. Установлено, что наиболее широко для измерения фазы сигналов используются интерферометры, построенные по схеме Маха-Цандера. Из анализа сделан вывод о более высоком разрешении при использовании комбинированного способа по сравнению с другими рассмотренными методами. Установлен его недостаток, заключающийся в наличии сложности и низкого быстродействия, обусловленного наличием интегратора, что не позволяет производить измерение спектральных составляющих радиоимпульса, если его длительность меньше временной апертуры. Предложен перспективный вариант построения спектроанализатора, в котором фаза определяется с помощью обработки сигнала.

Ключевые слова: погрешность, измерение, лазерные спектроанализаторы, радиосигналы, интерферометры

Введение

В настоящее время оптические методы находят все большее распространение при спектральном анализе радиосигналов. При этом оказывается возможным производить спектральный анализ как амплитуды, так и фазы частотных составляющих сигналов.

Для измерения фазы частотных составляющих радиосигналов используют интерференционные методы измерений. Наиболее широко для измерения фазы сигналов используются интерферометры, построенные по схеме Маха-Цандера [1, 2].

Из анализа сделан вывод о более высоком разрешении при использовании комбинированного способа по сравнению с другими рассмотренными методами. Установлен его недостаток, заключающийся в наличии сложности и низкого быстродействия, обусловленного наличием интегратора, что не позволяет производить измерение спектральных составляющих радиоимпульса, если его длительность меньше временной апертуры.

Предложен перспективный вариант построения спектроанализатора, в котором фаза определяется с помощью обработки сигнала.

Постановка задачи

Для расширения полосы пропускания может быть использован спектроанализатор, содержащий полупроводниковый лазер, на который подается широкополосный радиосигнал, коллиматор, дифракционную решетку, линейку фотоприемников и процессор.

Задачу - измерение амплитуды и фазы спектральных составляющих радиосигналов можно условно разбить на два этапа:

- получение спектральных составляющих широкополосного радиосигнала;
- измерение амплитуды и фазы полученных спектральных составляющих.

Осуществление первого этапа оптическими методами производится в основном двумя способами - пространственным или временным интегрированием широкополосного сигнала, введенного в акустооптический модулятор света.

Возможен также комбинированный вариант, сочетающий в себе эти два указанных способа, что позволяет обрабатывать сигнал с полосой частот, равной полной полосе частот акустооптического модулятора (АОМ).

При пространственном интегрировании разрешение сигнала по частоте в идеальном случае (без учета расходимости лазера и aberrаций оптики) составит

$$N_{\text{пр}} = \Delta f \cdot T_{\text{аом}} \quad (1)$$

где Δf - полоса частот;

$T_{\text{аом}} = D_{\text{аом}}/V$ - время задержки сигнала в АОМ;

$D_{\text{аом}}$ - апертура АОМ;

V - скорость звука в модуляторе.

При временном интегрировании получим

$$N_{\text{вр}} = d \cdot T \cdot T_{\text{аом}}, \quad (2)$$

где $d = \Delta f_{\text{лчм}}/\tau_{\text{лчм}}$ - крутизна ЛЧМ сигнала;

$\Delta f_{\text{лчм}}$ - девиация частоты ЛЧМ сигнала;

$\tau_{\text{лчм}}$ - время изменения ЛЧМ сигнала;

T - время интегрирования сигналов фотоприемником.

Поскольку ширина спектра ЛЧМ сигнала не может превышать ширину спектра исследуемого сигнала, $d \cdot T = \Delta f$ и следовательно, $N_{\text{вр}} = N_{\text{пр}}$, то выигрыша в разрешающей способности по частоте при временном интегрировании нет.

В комбинированном способе пространственное интегрирование производится по одной координате, а временное - по другой, что достигается ортогональной установкой модуляторов друг относительно друга. При этом разрешение будет равно

$$N_k = N_{\text{пр}} \cdot N_{\text{вр}} . \quad (3)$$

Таким образом, комбинированный способ имеет более высокое разрешение по частоте по сравнению с обоими рассмотренными выше способами. При втором для выделения амплитуды и фазы, полученных указанными способами спектральных составляющих сигнала в плоскость формирования спектра подается опорный пучок [3, 4].

Возможно два варианта формирования опорного пучка [4 - 6].

1) Частичная компенсация опорного пучка, когда опорный пучок формируется выделением первого порядка спектра, сформированного при подаче на АОМ сигнала, частота ω_0 которого совпадает с несущей частотой радиосигнала.

2) Полная компенсация опорного пучка, когда на опорный АОМ подается ЛЧМ сигнал.

В первом варианте интерференционный член каждой спектральной составляющей будет меняться с разностной частотой $\Delta\omega = \omega_i - \omega_0$, а во втором случае он не будет зависеть от частоты.

Далее возникает задача измерения амплитуды и фазы полученных спектральных составляющих. Измерение квадрата амплитуды спектральной составляющей возможно и без применения опорного пучка непосредственным измерением интенсивности дифрагированного на АОМ первого порядка спектра.

Что касается измерения фазовых составляющих спектра, то здесь имеется несколько возможных вариантов построения измерительных устройств в зависимости от применяемых методов измерения фазы.

Рассмотрим основные существующие методы измерения фазы сигналов. Все многообразие схем измерения фазы можно разбить на три следующие группы [5].

1) Компенсационные фазометры, основанные на уравнивании измеряемого фазового сдвига. Это, как правило приборы следящего типа, имеющие низкое быстродействие.

2) Цифровые фазометры с время-импульсным преобразованием. Эти фазометры получили наибольшее распространение.

3) Фазометры с ортогональной обработкой сигнала.

В свою очередь фазометры второй группы можно разделить на два типа:

- фазометры, осуществляющие измерение за один период исследуемого напряжения;
- фазометры, осуществляющие измерение усредненного значения фазового сдвига за несколько периодов исследуемого напряжения.

В фазометрах третьей группы применительно к оптическим спектроанализаторам, в которых необходимо осуществлять измерения фазы спектральных составляющих радиосигнала, фаза вычисляется по выражению

$$\Phi_i = \arctg[(J_{\pi/2} - A_c^2 + A_{\text{оп}}^2)/(J - A_c^2 + A_{\text{оп}}^2)] - (\omega_i - \omega_0) \cdot t_u, \quad (4)$$

где $J_{\pi/2}$ и J - интенсивности интерферирующих пучков при наличии и отсутствии фазосдвигающей пластинки $\pi/2$;

A_c и $A_{оп}$ - амплитуды сигнального и опорного лучей;

ω_i и ω_o - частоты сигнала и опорного напряжения;

t_u - длительность импульса лазера.

Недостатком фазометров третьей группы является их сложность, поскольку необходимо измерять несколько составляющих, входящих в выражение (4), а затем уже вычислять фазу.

Все это приводит и значительному снижению быстродействия при измерении фазы. Основное ограничение по быстродействию вносит вычислитель фазы, время вычисления в котором равно

$$t_{\text{выч}} = (4 \cdot N \cdot 2^m) / F,$$

где N - разрешающая способность анализатора по чистоте,

m - число разрядов, используемых АЦП;

F - производительность вычислителя.

Анализ показывает, что наиболее перспективным методом измерения фазы является время-импульсный метод. Однако, известные схемы цифровых фазометров, основанные на данном методе, не могут непосредственно использоваться в спектроанализаторах, так как они предназначены для измерения фазы только одной частоты сигнала. В связи с этим были разработаны ряд схем для измерения амплитуды и фазы частотных составляющих радиосигнала [5].

Рассмотрим первую из предложенных схем, приведенную на рис. 1. На рисунке обозначено: лазер 1, коллиматор 2, светоделитель 3, акустооптический модулятор 4, линза 5, диафрагма 6, линза 7, светоделитель 8, фотоприемник 9, перестраиваемый фильтр 10, преобразователь 11 амплитуда-код, формирователь 12 импульсов, триггер 13, интегратор 14, управляемый усилитель 15, аналого-цифровой преобразователь 16, зеркало 17, акустооптический преобразователь 18, линза 19, диафрагма 20, линза 21, зеркало 22, генератор 23 частоты, синхронизируемый генератор 24 частоты, формирователь 25 импульсов.

Пучок на выходе лазера расширяется коллиматором 2 и поступает на первый светоделитель 3, где луч расщепляется на два пучка; объектный пучок освещает акустооптический модулятор (АОМ) 4, на который подается входной сигнал, а опорный пучок поступает на АОМ 18, на который подается синусоидальный сигнал от генератора частоты 23.

Далее с помощью линз и 7, 19, 21 и диафрагм 6, 20 выделяются первые порядки дифрагированных на модуляторах пучков, которые с помощью светоделителя 6 сводятся на фотоприемнике 9.

Причем опорный пучок перекрывает весь спектр входного сигнала. В плоскости фотоприемника 9 пучки будут интерферировать. Тогда можно получить следующее выражение [7]

$$J_i = A_{ci}^2 + A_{он}^2 + 2A_c \cdot A_{он} \cdot \cos[(2\pi x \cdot \sin \alpha) / \lambda + (\omega_i - \omega_{он})t - \Phi_i(x, 0)]. \quad (5)$$

U_4 - напряжение на выходе формирователя 12;

U_5 - напряжение на выходе триггера 13;

U_6 - напряжение на выходе интегратора 14.

Сигналы на выходе фотоприемника 9 поступают на перестраиваемый фильтр 10, причем постоянная составляющая в выражении (9) отфильтровывается.

На выходе фильтра 10 будет выделяться сигнал

$$U_2 = 2S \cdot A_c \cdot A_{on} \cdot \cos[(2\pi x/\lambda) \cdot \sin \alpha + \Phi_i(x,0) + 2\pi \Delta \cdot f_{it}] \quad (10)$$

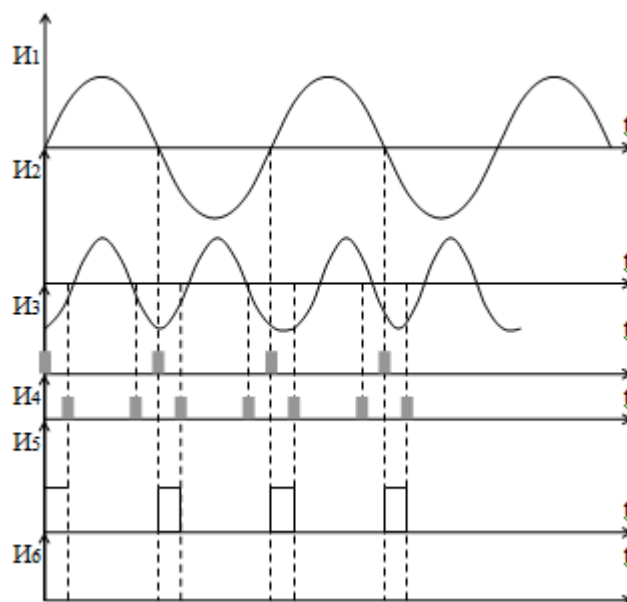


Рис. 2. Временные диаграммы работы S - коэффициент передачи фотоприемника совместно с фильтром.

Далее этот сигнал поступает на преобразователь 11, на выходе которого формируется код, пропорциональный амплитуде сигнала в выражении (10), т.е. спектру амплитуд A_{ci} каждой частотной составляющей радиосигнала. Для определения точности измерения найдем погрешность измерения методом дифференцирования передаточной функции (10) устройства. Тогда получим:

$$\Delta U \approx 2 \sqrt{\Delta S^2 \cdot A_c^2 \cdot A_{on}^2 + \Delta A_c^2 \cdot S^2 \cdot A_{on}^2 + \Delta A_{on}^2 \cdot S^2 \cdot A_c^2} \quad (11)$$

Для данного устройства входящие в выражение (11) составляющие имеют приблизительно следующие значения:

$$S = 5 \cdot 10^5 \frac{B \cdot \text{мм}^2}{B \cdot \text{м}}; \Delta S = 1000 \frac{B \cdot \text{мм}^2}{B \cdot \text{м}}; A_{on} = 3 \cdot 10^{-2} \frac{B \cdot \text{м}^{0,5}}{\text{мм}}; \Delta A_{on} = 3 \cdot 10^{-4} \frac{B \cdot \text{м}^{0,5}}{\text{мм}}; A_c = 10^{-4} \frac{B \cdot \text{м}^{0,5}}{\text{мм}};$$

$$\Delta A_c = 10^{-6} \frac{B \cdot \text{м}^{0,5}}{\text{мм}}.$$

Подставляя эти значения в (11) получим $\Delta U = 0,042 B$.

Для измерения фазы $\Phi_i(x,0)$ сигнал U_2 сравнивается с напряжением U_1 на выходе генератора 24. Напряжения U_1 и U_2 поступают на формирователи 25 и 12, которые формируют импульсы в моменты перехода напряжений через нуль (напряжения U_3 и U_4 на рис.

2). Эти импульсы поступают на триггер 13, на выходе которого формируется временной интервал (напряжение U_3 , U_4 на рис. 2), длительность которого равна

$$t_i = (\Phi_i(x, 0) + (2\pi x \cdot \sin \alpha / \lambda)) / 2\pi \cdot \Delta f \cdot i. \quad (12)$$

Из (12) видно, что t_i зависит и от Δf_i , которое меняется в зависимости от выделяемой частотной составляющей. Импульсы с вывода триггера 13 поступают на интегратор 14, который преобразует длительность временного интервала в амплитуду сигнала $U_{\text{вых}} = t_i \cdot U_m / T$. Чтобы компенсировать изменение Δf_i , применяется усилитель 15 с регулируемым коэффициентом усиления

$$K = c_{i.}, \quad (13)$$

где c - минимальный коэффициент усиления при $i = 1$.

Напряжение на выходе усилителя 15 равно

$$U = U_{\text{вых}} \cdot K = U_m \cdot \Phi_i(x, 0) / 2\pi \cdot T \cdot \Delta f. \quad (14)$$

Из (14) видно, что напряжение пропорционально фазе частотной составляющей и не зависит от номера частотной составляющей. Аналого-цифровой преобразователь преобразует напряжение в код, соответствующей измеряемой фазе частотной составляющей. Недостатком устройства является его сложность, а также сравнительно низкое быстродействие, обусловленное наличием интегратора. Поэтому такая схема не позволяет производить измерение спектральных составляющих радиоимпульса, если его длительность меньше временной апертуры АОМ [[6-8].

Перспективным вариантом построения спектроанализатора является устройство, в котором фаза определяется с помощью обработки сигнала [5-8].

Схема устройства приведена на рис. 3. Спектроанализатор содержит лазер 1, фильтр 2, коллиматор 3, акустооптические модуляторы 4, 5, 6, цилиндрическую линзу 7, щелевую диафрагму 8, цилиндрическую линзу 9, линейки 10, 11, 12, 13 фотоприемников, формирователь 14 импульсов, линию 15 задержки и генератора 16 с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ).

Спектроанализатор работает, следующим образом. Пучок света лазера 1 через фильтр 2 поступает на коллиматор 3, который расширяет пучок, чтобы осветить апертуры акустооптических модуляторов 4, 5, 6. Ширина модулятора 6 выбирается равной $3 l_{\text{фп}}$, где $l_{\text{фп}}$ - шаг между линейками фотоприемников, ширина модулятора 5 выбирается равной ширине линейки 11 фотоприемников, ширина модулятора 4 равна $2 l_{\text{фп}}$.

Цилиндрическая линза 7 фокусирует дифрагированные на модуляторах 4, 5, 6 пучки в плоскость щелевой диафрагмы 8, которая выделяет только первые порядки дифрагированных пучков, цилиндрическая линза 9 увеличивает по одной координате изображение спектра до размера линейки фотоприемников [9, 10].

На линейку 10 будет поступать дифрагированный свет первого порядка от модулятора 6, линейка 10 измеряет амплитудный спектр сигнала, на линейке 11 будут интерферировать пучки от модуляторов 5, 6, на линейке 12 будут интерферировать пучки от модуляторов 4, 6, на линейку 13 поступают дифрагированные пучки от модулятора 4 (опорные пучки).

Устройство предназначено для спектрального анализа радиоимпульсов, длительность $\tau_{р.и.}$ которых меньше временной апертуры модулятора $T_{мод.}$

Радиоимпульс поступает на модулятор 6 и одновременно на формирователь 14, который формирует импульс длительность $\tau_{ф.л}=\tau_{р.и.}$ Формирователь 14 может состоять из амплитудного детектора, выделяющего огибающую импульса, и компаратора.

Таким образом, длительность импульса на выходе формирователя 14 будет равна длительности входного радиоимпульса. Этот импульс задерживается в линии 15 на величину τ_3 . Импульс с формирователя 14 и линии 15 запускают генераторы 16, 17 с ЛЧМ.

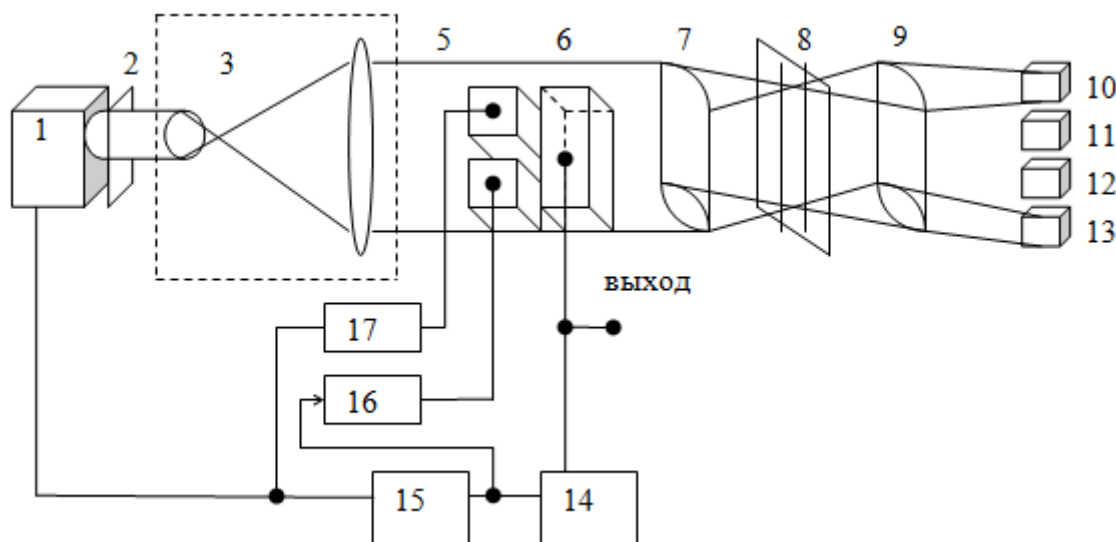


Рис. 3. Спектроанализатор с обработкой сигнала

Импульс с линии 15 запускает лазер 1, в качестве которого может быть выбран полупроводниковый лазер. На выходах генераторов 16 и 17 будут сформированы следующие ЛЧМ сигналы

$$U_{16} = U_m \cdot \cos(\omega_1 t + \beta t^2) \text{ при } 0 \leq t \leq t_{р.и.}, \quad (15)$$

$$U_{16} = 0 \text{ при } t > t_{р.и.},$$

$$U_{17} = U_m (\cos \omega 2(t - \tau_3) + \beta(t - \tau_3)^2) \text{ при } \tau_3 \leq t \leq \tau_3 + t_{р.и.}, \quad (16)$$

$$U_{17} = 0 \text{ при } t > \tau_3 + t_{р.и.}.$$

Здесь U_m - амплитуда ЛЧМ сигнала;

ω_1 - начальная частота;

β - параметр ЛЧМ сигнала;

τ_3 - время задержки импульса в линии 15.

Сигналы с выхода генераторов 16 и 17 поступают на модуляторы 4 и 5. Девиация частоты генераторов 16, 17 выбирается равной ширине полосы радиоимпульса. Тогда в плоскости интерференции спектр ЛЧМ сигнала перекроет спектр сигнала [11, 12].

При $\tau_3 \ll t_{р.и.}$ спектры ЛЧМ сигналов с генераторов 16, 17 можно представить в виде

$$F(U_{16}) = S_{лчм} \cdot \exp(i(\omega_1 t + \beta t^2)), \quad (17)$$

$$F(U_{17})=S_{\text{лчм}} \cdot \exp[(\omega_2 - \beta\tau_3)t + \beta t^2 + \beta\tau_3^2 - \omega_0\tau_3]_i], \quad (18)$$

где $S_{\text{лчм}}$ - амплитудный спектр ЛЧМ сигнала.

Выберем $\omega_2 - 2\beta\tau_3 = \omega_1$, $\tau_3^2\beta - \omega_0\tau_3 = \pi/2$, тогда выражение (17) можно представить в виде

$$F(U_{17})=S_{\text{лчм}} \exp i(\omega_1 t + \beta t^2 + \pi/2). \quad (19)$$

С учетом (17) и (18) можно записать следующее выражение для интенсивностей света на i -м фотоприемнике линеек 11 и 12

$$J_{12}=S_c^2 + S_{\text{лчм}}^2 + 2S_c \cdot S_{\text{лчм}} \cdot \cos[\Phi_i(x,0)], \quad (20)$$

$$J_{11}=S_c^2 + S_{\text{лчм}}^2 + 2S_c \cdot S_{\text{лчм}} \cdot \sin[\Phi_i(x,0)]. \quad (21)$$

Здесь S_c - амплитуда спектра сигнала;

$\Phi_i(x,0)$ - фаза i -ой частотной составляющей радиосигнала;

x - координата в плоскости линеек фотоприемников.

В выражениях (20) и (21) разность частот сигнала и ЛЧМ сигнала для каждого фотоприемника равна нулю, ибо девиация ЛЧМ сигнала выбирается равной ширине полосы сигнала. Из выражений (20) и (21) получим [14-16]

$$\Phi_i(x,0)=\arctg[(J_{11}-S_c^2-S_{\text{лчм}}^2)/(J_{12}-S_c^2-S_{\text{лчм}}^2)]. \quad (22)$$

Для считывания информации в устройстве импульс с выхода линии 15 запускает лазер 1. Импульс на выходе лазера должен быть сформирован тогда, когда радиоимпульс полностью войдет в апертуру модулятора.

Для этого устройство на выходе лазера 1 может быть включена еще одна линия задержки и одновибратор (на рисунке не показаны). В результате на выходе лазера будет сформирован импульс длительностью $\tau_{p.u} < \tau_{\text{лаз}} < T_{\text{аом}}$. За счет введения двух генераторов 16, 17, линии 15 и формирователя 14 значительно упрощается устройство, так как отсутствует несколько опорных генераторов частот. Оценим погрешность измерения фазы по выражению (22). Для малых значениях аргумента $\arctg$ можно заменить его аргументом. Тогда используя рассмотренный выше метод дифференцирования, получим:

$$\Delta\Phi \approx \sqrt{4 \cdot \left[\frac{S_c}{J_{12} - S_c^2 - S_{\text{лчм}}^2} + \frac{S_c(J_{11} - S_c^2 - S_{\text{лчм}}^2)}{J_{12} - S_c^2 - S_{\text{лчм}}^2} \right]^2 \Delta S_c^2 + 4 \cdot \left[\frac{S_{\text{лчм}}}{J_{12} - S_c^2 - S_{\text{лчм}}^2} + \frac{S_{\text{лчм}}(J_{11} - S_c^2 - S_{\text{лчм}}^2)}{J_{12} - S_c^2 - S_{\text{лчм}}^2} \right]^2 \Delta S_{\text{лчм}}^2 + \left[\frac{1}{J_{12} - S_c^2 - S_{\text{лчм}}^2} \right]^2 \Delta J_{11}^2 + \left[\frac{(J_{11} - S_c^2 - S_{\text{лчм}}^2)}{(J_{12} - S_c^2 - S_{\text{лчм}}^2)^2} \right]^2 \Delta J_{12}^2} \quad (23)$$

Значения входящих в (23) параметров, аналогично предыдущему расчету на точность, будут иметь следующий вид:

$$S_{\text{лчм}} = 3 \cdot 10^{-4} \frac{Bm}{мм}; \Delta S_{\text{лчм}} = 3 \cdot 10^{-6} \frac{Bm^{0.5}}{мм}; S_c = 10^{-4} \frac{Bm^{0.5}}{мм}; \Delta S_c = 10^{-6} \frac{Bm^{0.5}}{мм}; J_{11} = 10^{-7} \frac{Bm}{мм^2}; \Delta J_{11} = 10^{-9} \frac{Bm}{мм^2};$$

$$J_{12} = 1,3 \cdot 10^{-7} \frac{Bm}{мм^2}; \Delta J_{12} = 10^{-9} \frac{Bm}{мм^2}.$$

Подставляя эти значения в (23), получим $\Delta\Phi = 1,8^\circ$.

Устройство может быть выполнено более широкополосным, если модулировать лазерное излучение входным сигналом, а его спектральные составляющие выделить дифракционной решеткой или интерферометром Фабри-Перо [17].

Оптическая схема спектроанализатора приведена на рис. 4.

Устройство содержит лазер 1, коллиматор 2 дифракционную решетку 3, объектив 4, линейку фотоприемников 5. Входной широкополосный сигнал подается на лазер, интенсивность излучения которого будет модулироваться этим сигналом.

В качестве лазера может быть использован полупроводниковый лазер или газовый лазер в сочетании с электрооптическим модулятором.

Далее пучок расширяется коллиматором и освещает дифракционную решетку которая вместе с линзой осуществляет спектральный анализ.

Линейка фотоприемников воспроизводит спектр сигнала. Оценим возможную разрешающую способность такого спектроанализатора по частоте. Если использовать дифракционную решетку, то разрешающая способность будет равна [18-20]

$$R = (\omega_{\text{св}} / \Delta\omega_{\text{с}}) = m \cdot N, \quad (24)$$

где $\omega_{\text{св}}$ - частота света;

$\Delta\omega_{\text{с}}$ - разрешаемая частота сигнала;

m - порядок спектра;

N - число штрихов в решетке.

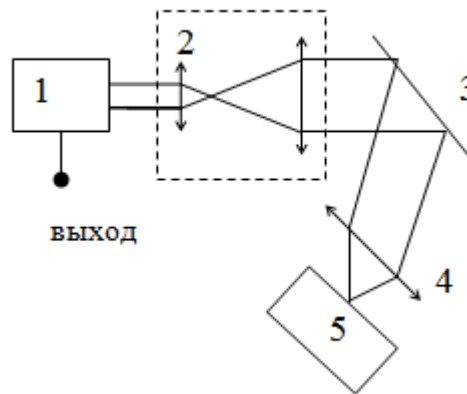


Рис. 4. Широкополосный спектроанализатор

Положим, что ширина решетки $L=100$ мм, пространственная частота штрихов решетки $f_p=5000$ лин/мм, тогда $N=L \cdot f_p=100 \cdot 5000=5 \cdot 10^5$ и при $m=2$, получим

$$R = (\omega_{\text{св}} / \Delta\omega_{\text{с}}) = m \cdot N = 10^6.$$

Поскольку $\omega_{\text{св}} \approx 10^{14}$ Гц, то $\Delta\omega_{\text{с}} = 10^8$ Гц.

Для увеличения разрешающей способности системы вместо дифракционной решетки можно использовать интерферометр Фабри-Перо.

Разрешающая способность такого спектроанализатора может быть определена следующим образом [20-23]

$$R = t / \Delta t. \quad (25)$$

Здесь t - расстояние между зеркалами интерферометра;

Δt - ошибка изготовления зеркал.

В настоящее время достигнута точность изготовления зеркал $\Delta t = \lambda/100$, тогда при $t = 200$ мм, $\lambda = 0,5 \cdot 10^{-3}$ мм, получим $R = t/\Delta t = 4 \cdot 10^7$. Тогда разрешимая частота сигнала $\Delta \omega_c = 2,5 \cdot 10^6$ Гц.

Если использовать опорный пучок, то можно определить и фазу частотных составляющих сигнала.

Заключение

Проведенный анализ показал, что имеется возможность производить спектральный анализ как амплитуды, так и фазы частотных составляющих сигналов и использования для анализа фазы частотных составляющих радиосигналов интерференционных методов измерений.

Наиболее широко применимыми для измерения фазы сигналов являются интерферометры, построенные по схеме Маха - Цандера.

Рассмотрено использование комбинированного способа, который дает более высокое разрешение по сравнению с другими методами.

Установлен его недостаток, заключающийся в наличии сложности и низкого быстродействия, обусловленного наличием интегратора, что не позволяет производить измерение спектральных составляющих радиоимпульса, если его длительность меньше временной апертуры.

Предложен перспективный вариант построения спектроанализатора, в котором фаза определяется с помощью обработки сигнала.

Определена разрешающая способность при применении такого спектроанализатора.

Рассчитаны абсолютные погрешности предложенных устройств.

Список литературы

1. Шрёдер Г. Трайбер Х. Техническая оптика: пер. с нем. / под ред. Р.Е. Ильинского. М.: Техносфера, 2006. 424 с. [Shroder G., Treiber H. Technische Optic. Vogel Industrie Medien GmbH, Wurzburg. 2002. 424 p.].
2. Sharma K.K. Optics: principles and applications. New York: Academic Press, 2006. 638 p.
3. Кейсесент Д., Колфилд Х., Томсон Б. Оптическая обработка информации. Применение: пер. с англ. / под ред. С.Б. Гуревича. М.: Мир, 1980. 349 с. [Optical Data Processing. Applications / ed. by D. Casasent. Springer Berlin Heidelberg, 1978. 286 p. DOI: [10.1007/BFb0057980](https://doi.org/10.1007/BFb0057980)].
4. Могильницкий Б.С. Интерферометр Фабри-Перо при импульсном освещении: новый подход и возможности // Измерительная техника. 2009. № 12. С. 11-15.
5. Титов А.А., Амурский В.Б., Гарипов В.К. Методы построения и расчета лазерных измерительных и запоминающих устройств. М.: Машиностроение, 2008. 133 с.

6. Козин Г.И., Кузнецов А.П., Лебединский М.О. Лазерное гетеродинирование гауссовых пучков с частичной пространственной когерентностью // Квантовая электроника. 2005. Т. 35, № 5. С. 429-434.
7. Кривоносов А.И. Оптоэлектронные устройства. М.: Энергия, 2008. 99 с.
8. Джексон Р.Г. Новейшие датчики: пер. с англ. / под ред. В.В. Лучинина. М.: Техносфера, 2007. 384 с. [Jackson R.G. Novel sensors and sensing. Institute of Physics publishing, Bristol and Philadelphia, 2004. 394 p.].
9. Фрайден Дж. Современные датчики. Справочник: пер. с англ. / под ред. Е.Л. Свинцова. М.: Техносфера, 2005. 527 с. [Friden D. Handbook of modern sensors. Springer New York, 2004. 527 p. DOI: [10.1007/b97321](https://doi.org/10.1007/b97321)].
10. Гришин С. Г. Гетеродинная лазерная интерференционная система для измерения линейных перемещений с анизотропным акустооптическим преобразованием частоты света: автореф. дис. ... канд. экон. наук. М., 2012. 16 с.
11. Иванов В. С., Золотаревский Ю. М., Котюк А. Ф., Либерман А.А., Саприцкий В.И., Чупраков В.Ф., Улановский М.В., Столяревская Р.И. Основы оптической радиометрии. М.: Физматлит, 2003. 544 с.
12. Fox N.P. Radiometry with cryogenic radiometers and semiconductor photodiodes // Metrologia. 2003. Vol. 32, no. 6. P. 535-543. DOI: [10.1088/0026-1394/32/6/28](https://doi.org/10.1088/0026-1394/32/6/28)
13. Панченко В.Я., Голубев В.С., Васильцов В.В., Галушкин М.Г. и др. Лазерные технологии обработки материалов: современные проблемы фундаментальных исследований и прикладных разработок / под ред. В.Я. Панченко. М.: Физматлит, 2009. 664 с.
14. Риле Ф. Стандарты частоты. Принципы и приложения. М.: Физматлит, 2009. 512 с. [Riehle F. Frequency Standarts. Basic and Applications. Wiley-VCH, 2004. 526 p.].
15. Ермаков О.Н. Прикладная оптоэлектроника. М.: Техносфера, 2004. 414 с.
16. Кирилловский В.К. Современные оптические исследования и измерения. СПб.: Лань, 2010. 303 с.
17. Зверев В.А., Точилина Т.В. Основы оптоэлектроники: учеб. пособие. СПб.: СПбГУ ИТМО, 2005. 293 с.
18. Махов Е.М., Потапов А.И., Махов В.Е. Прикладная оптика: учеб. пособие. СПб.: СЗТУ, 2004. 348 с.
19. Advanced Holography – Metrology and Imaging / ed. by I. Naydenova. Published by InTech, Croatia, 2011. 374 p.
20. Патракеев Н.В., Потапов А.И., Махов В.Е. Исследование реальных объектов возможности автоматизации проектирования контрольно-измерительных систем // Компоненты и технологии. 2007. № 2 (67). С. 138-141.
21. Tonda-Goldstein S., Dolfi D., Huignardet J.-P., Sape' Ph., Granger G., Chazelas J. Optoelectronic arbitrary-waveform generator for radar applications // Optical Engineering. 2000. Vol. 39, no. 12. P. 3294-3300. DOI: [10.1117/1.1327901](https://doi.org/10.1117/1.1327901)
22. Hariharan P. Basics of Interferometry. 2nd ed. New York, Academic Press, 2007. 226 p.

Assessment of Measurement Error when Using the Laser Spectrum Analyzers

A.A. Titov¹, V.K. Garipov^{1,*},
M.A. Kostromin¹

* garvad11@gmail.com

¹Moscow State University of Information Technologies,
Radio Engineering and Electronics, Moscow, Russia

Keywords: error, measurement, laser spectrum analyzers, radio signals, interferometers

The article dwells on assessment of measurement errors when using the laser spectrum analyzers. It presents the analysis results to show that it is possible to carry out a spectral analysis of both amplitudes and phases of frequency components of signals and to analyze a changing phase of frequency components of radio signals using interferential methods of measurements. It is found that the interferometers with Mach-Zehnder arrangement are most widely used for measurement of signal phase. A possibility to increase resolution when using the combined method as compared to the other considered methods is shown since with its application spatial integration is performed over one coordinate while time integration is done over the other coordinate that is reached by the orthogonal arrangement of modulators relative each other. The article defines a drawback of this method. It is complicatedness and low-speed because of integrator that disables measurement of spectral components of a radio pulse if its width is less than a temporary aperture. There is a proposal to create an advanced option of the spectrum analyzer in which phase is determined through the signal processing. The article presents resolution when using such a spectrum analyzer. It also reviews the possible options for creating devices to measure the phase components of a spectrum depending on the methods applied to measure a phase. The analysis has shown that for phase measurement a time-pulse method is the most perspective. It is found that the known circuits of digital phase-meters using this method cannot be directly used in spectrum analyzers as they are designed for measurement of the phase only of one signal frequency. In this regard a number of circuits were developed to measure the amplitude and phase of frequency components of the radio signal. It is shown that the perspective option of creating a spectrum analyzer is device in which the phase is determined through the signal processing. The article presents a function diagram of such spectrum analyzer and a time diagram of its operation.

References

1. Shroder G., Treiber H. *Technische Optic*. Vogel Industrie Medien GmbH, Wurzburg. 2002. 424 p. (Russ. ed.: Shroder G., Treiber H. *Tekhnicheskaya optika*. Transl. from German. Moscow, Tekhnosfera Publ., 2006. 424 p.).
2. Sharma K.K. *Optics: principles and applications*. New York, Academic Press, 2006. 638 p.
3. Casasent D., ed. *Optical Data Processing. Applications*. Springer Berlin Heidelberg, 1978. 286 p. DOI: [10.1007/BFb0057980](https://doi.org/10.1007/BFb0057980) (Russ. ed.: Casasent D., Caulfield H., Thompson B. *Opticheskaya obrabotka informatsii. Primeneniya*. Moscow, Mir Publ., 1980. 349 p.).
4. Mogilnitskii B.S. Fabry–Perot interferometer in pulsed illumination: a new approach and capabilities. *Izmeritel'naya tekhnika*, 2009, no. 12, pp. 11-15. (English version of journal: *Measurement Techniques*, 2009, vol. 52, is. 12, pp. 1263-1270. DOI: [10.1007/s11018-010-9431-z](https://doi.org/10.1007/s11018-010-9431-z)).
5. Titov A.A., Amurskii V.B., Garipov V.K. *Metody postroeniya i rascheta lazernykh izmeritel'nykh i zapominayushchikh ustroystv* [Methods of construction and calculation of laser measuring and memory devices]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2008. 133 p. (in Russian).
6. Kozin G.I., Kuznetsov A.P., Lebedinskii M.O. Laser heterodyning of Gaussian beams with partial spatial coherence. *Kvantovaya elektronika*, 2005, vol. 35, no. 5, pp. 429-434. (English version of journal: *Quantum Electronics*, 2005, vol. 35, no. 5, pp. 429-434. DOI: [10.1070/QE2005v035n05ABEH002861](https://doi.org/10.1070/QE2005v035n05ABEH002861)).
7. Krivonosov A.I. *Optoelektronnye ustroystva* [Optoelectronic devices]. Moscow, Energiya Publ., 2008. 99 p. (in Russian).
8. Jackson R.G. *Novel sensors and sensing*. Institute of Physics publishing, Bristol and Philadelphia. 2004. 394 p. (Russ. ed.: Jackson R.G. *Noveishie datchiki*. Moscow, Tekhnosfera Publ., 2007. 384 p.).
9. Friden D. *Handbook of modern sensors*. Springer New York, 2004. 527 p. DOI: [10.1007/b97321](https://doi.org/10.1007/b97321) (Russ. ed.: Friden D. *Sovremennye datchiki. Spravochnik*. Moscow, Tekhnosfera Publ., 2005. 527 p.).
10. Grishin S.G. *Geterodinnaya lazernaya interferentsionnaya sistema dlya izmereniya lineinykh peremeshchenii s anizotropnym akustoopticheskim preobrazovaniem chastoty sveta. Avtoreferat kand. diss.* [Heterodyne laser interferential system for measurement of linear movements with anisotropic optical-acoustic transformation of frequency of light. Abstract of cand. diss.]. Moscow, 2012. 16 p. (in Russian, unpublished).
11. Ivanov V. S., Zolotarevskii Yu. M., Kotyuk A. F., Liberman A.A., Sapritskii V.I., Chuprakov V.F., Ulanovskii M.V., Stolyarevskaya R.I. *Osnovy opticheskoi radiometrii* [Fundamentals of optical radiometry]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2003. 544 p. (in Russian).
12. Fox N.P. Radiometry with cryogenic radiometers and semiconductor photodiodes. *Metrologia*, 2003, vol. 32, no. 6, pp. 535-543. DOI: [10.1088/0026-1394/32/6/28](https://doi.org/10.1088/0026-1394/32/6/28)

13. Panchenko V.Ya., Golubev V.S., Vasil'tsov V.V., Galushkin M.G., et al. *Lazernye tekhnologii obrabotki materialov: sovremennye problemy fundamental'nykh issledovaniy i prikladnykh razrabotok* [Laser technologies of processing of materials: modern problems of basic researches and applied development]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2009. 664 p. (in Russian).
14. Riehle F. *Frequency Standarts. Basic and Applications*. Wiley-VCH, 2004. 526 p. (Russ. ed.: Riehle F. *Standarty chastoty. Printsipy i prilozheniya*. Moscow, Fizmatlit Publ., 2009. 512 p.).
15. Ermakov O.N. *Prikladnaya optoelektronika* [Applied optoelectronics]. Moscow, Tekhnosfera Publ., 2004. 414 p. (in Russian).
16. Kirillovskii V.K. *Sovremennye opticheskie issledovaniya i izmereniya* [Modern optical researches and measurements]. St. Petersburg, Lan' Publ., 2010. 303 p. (in Russian).
17. Zverev V.A., Tochilina T.V. *Osnovy optotekhniki* [Optical Engineering Fundamentals]. St. Petersburg, SPbSU ITMO Publ., 2005. 293 p. (in Russian).
18. Makhov E.M., Potapov A.I., Makhov V.E. *Prikladnaya optika* [Applied optics]. St. Petersburg, Publ. of North-West Customs Administration, 2004. 348 p. (in Russian).
19. Naydenova I., ed. *Advanced Holography – Metrology and Imaging*. Published by InTech, Croatia, 2011. 374 p.
20. Patrakeev N.V., Potapov A.I., Makhov V.E. LABVIEW 8 – the new possibilities of computer aided design of control and measurement systems. *Komponenty i tekhnologii = Components and Technologies*, 2007, no. 2 (67), pp. 138-141. (in Russian).
21. Tonda-Goldstein S., Dolfi D., Huignardet J.-P., Sape' Ph., Granger G., Chazelas J. Optoelectronic arbitrary-waveform generator for radar applications. *Optical Engineering*, 2000, vol. 39, no. 12, pp. 3294-3300. DOI: [10.1117/1.1327901](https://doi.org/10.1117/1.1327901)
22. Harikharan P. *Basics of Interferometry*. 2nd ed. New York, Academic Press, 2007. 226 p.