

(19)



**Евразийское
патентное
ведомство**

(11) **040512**

(13) **B1**

(12) **ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ЕВРАЗИЙСКОМУ ПАТЕНТУ**

(45) Дата публикации и выдачи патента
2022.06.14

(51) Int. Cl. **G01R 27/06** (2006.01)

(21) Номер заявки
201900551

(22) Дата подачи заявки
2019.10.30

(54) **ИЗМЕРИТЕЛЬ КОМПЛЕКСНЫХ КОЭФФИЦИЕНТОВ ОТРАЖЕНИЯ И ПЕРЕДАЧИ В МИЛЛИМЕТРОВОМ ДИАПАЗОНЕ ДЛИН ВОЛН**

(43) **2021.05.31**

(56) RU-C2-2488838
US-B2-8212573
SU-A-1125556
SU-629823

(96) **2019/EA/0091 (BY) 2019.10.30**

(71)(73) Заявитель и патентовладелец:
**УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ
"БЕЛОРУССКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ ИНФОРМАТИКИ И
РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ" (BY)**

(72) Изобретатель:
**Боровская Марина Анатольевна,
Копшай Алексей Андреевич,
Гусинский Александр Владимирович,
Кондрашов Денис Александрович,
Ворошень Алексей Владимирович,
Кострикин Анатолий Михайлович
(BY)**

(57) Изобретение относится к технике измерений в миллиметровом диапазоне длин волн и может быть использовано при разработке, испытаниях и исследованиях СВЧ-устройств, применяемых в радиолокации, измерительной технике, технике связи, медицине, системах безопасности, при проведении измерений параметров СВЧ-сигналов, где требуется на входе объекта измерения обеспечить стабильный уровень генерируемых сигналов, а для обработки измеренного сигнала обеспечить его перенос на промежуточную частоту с малыми потерями преобразования. Техническим результатом изобретения является формирование стабильного и более высокого по уровню мощности сигнала в гетеродинном канале опорного и измерительного сигналов измерителя комплексных коэффициентов отражения и передачи в миллиметровом диапазоне длин волн, что обеспечивает малые потери преобразования на смесителях, а также упрощение конструкции и снижение стоимости измерительной системы. Задача достигается тем, что разрабатывается конструкция измерителя, состоящего из измерительного блока и выносного преобразователя СВЧ-сигнала. В гетеродинном канале опорного и измерительного сигнала исключаются умножители частоты, и сигнал от гетеродина подается непосредственно на входы смесителей на гармониках, а на выходах смесителей устанавливаются полосовые фильтры. Заявленный принцип измерения может применяться как в диапазоне частот от 118,1 до 178,4 ГГц, так и в диапазоне частот от 178,4 до 258,4 ГГц. При этом используются различные схемы реализации измерительного устройства.

B1

040512

040512

B1

Изобретение относится к технике измерений в миллиметровом диапазоне длин волн и может быть использовано при разработке, испытаниях и исследованиях СВЧ-устройств, применяемых в радиолокации, астрофизике, измерительной технике, технике связи, медицине, системах безопасности, при проведении измерений параметров СВЧ-сигналов, где требуется на входе объекта измерения обеспечить стабильный уровень генерируемых сигналов и малое значение флуктуации их фазы при реализации перестройки в широком спектре диапазонов частот, для обработки измеренного сигнала - обеспечить его перенос на промежуточную частоту с малыми потерями преобразования.

Известны измерители комплексных коэффициентов отражения и передачи в диапазоне от 25 до 118 ГГц [1], состоящие из двух измерительных блоков и персональной ЭВМ с контроллером КОП, который выполнен в виде платы и вставляется в конструктив персональной ЭВМ. Измерительный СВЧ-тракт разделен на две части, каждая из которых расположена в отдельных измерительных блоках, что обеспечивает автоматизацию измерения всех S-параметров объекта измерения любых геометрических размеров. Недостатками таких измерителей являются ограниченная полоса частот измерения (до 118 ГГц); громоздкость и сложность конструкции.

Наиболее близкой по технической сущности к заявляемому изобретению является измерительная система [2], включающая векторный анализатор цепей Anritsu ME7808C с внешними расширителями частоты OML WR05. К векторному анализатору цепей гетеродинного типа, позволяющему проводить измерения на частотах до 110 ГГц, подключают модули передачи/отражения (T/R) для расширения частоты до 220 ГГц и проведения измерений S-параметров в данном диапазоне частот. Типичная система использует два модуля T/R для обеспечения возможности непрерывного измерения комплексных коэффициентов отражения и передачи S_{11} , S_{12} , S_{21} , S_{22} .

Менее дорогие системы с одним T/R-модулем и одним T-модулем позволяют проводить только измерения параметров S_{11} и S_{21} . Для получения данных по S_{12} и S_{22} пользователь должен отсоединить испытуемое устройство, изменить его направление и снова подсоединить к измерительной системе. T/R-модуль включает в себя удвоитель частоты и умножитель частоты на 8, который действует как системный источник СВЧ-сигнала. Входная частота изменяется от 8,75 до 13,75 ГГц. Измерительная секция модуля содержит двойной направленный ответвитель, опорный понижающий преобразователь и измерительный понижающий преобразователь. Сигнал гетеродина частотой от 11,6 до 18,4 ГГц преобразуется в умножителе частоты на 12 и питает смесители. Уровень сигнала гетеродина поддерживается постоянным с помощью усилителей. T-модуль включает в себя единственный понижающий преобразователь, идентичный используемому в T/R-модуле.

Недостатками прототипа являются, во-первых, использование в расширительных модулях в гетеродинном канале измерительного и опорного сигналов умножителей частоты на 12, что приводит к уменьшению мощности сигнала гетеродина на входах смесителей и, следовательно, к увеличению потерь преобразования, усложнению конструкции самого расширителя частоты. Во-вторых, сложность и высокая стоимость конструкции измерительной системы из-за использования дорогостоящего векторного анализатора цепей зарубежного производства (Anritsu) и как минимум двух расширительных модулей (T/R и T) для проведения измерений в диапазоне частот до 220 ГГц.

Задача изобретения - обеспечение возможности формирования стабильного и более высокого по уровню мощности сигнала в гетеродинном канале опорного и измерительного сигналов измерителя комплексных коэффициентов отражения и передачи (S_{11} , S_{12} , S_{21} , S_{22}) в миллиметровом диапазоне длин волн для достижения малых потерь преобразования на смесителях, а также упрощение конструкции и снижение стоимости измерительной системы.

Указанная задача достигается тем, что разрабатывается конструкция измерителя, состоящего из измерительного блока и выносного преобразователя СВЧ-сигнала. В гетеродинном канале опорного и измерительного сигналов исключаются умножители частоты, и сигнал от гетеродина подается непосредственно на входы смесителей на гармониках, а на выходах смесителей устанавливаются полосовые фильтры на 97-103 кГц.

Принцип действия измерителя основан на раздельном выделении падающей на объект измерения, отраженной и прошедшей волн СВЧ-сигнала. Напряжения, пропорциональные амплитудам падающей, отраженной и прошедшей волн, полученные с использованием специального алгоритма вычисления, преобразуются в значения измеряемых параметров: модуль $|S_{11(22)}|$ и фазу $\arg S_{11(22)}$ коэффициента отражения, КСВН, модуль $|S_{21(12)}|$ и фазу $\arg S_{21(12)}$ коэффициента передачи. Измеряемые параметры отображаются в виде частотных зависимостей в декартовой системе координат с отсчетом с помощью маркера значений измеряемых параметров в любой частотной точке диапазона рабочих частот измерителя.

Заявленный принцип измерения может применяться как для диапазона частот от 118,1 до 178,4 ГГц, так и для диапазона частот от 178,4 до 258,4 ГГц. При этом используются различные схемы реализации измерительного устройства.

На фиг. 1 изображена блок-схема измерителя комплексных коэффициентов отражения и передачи в диапазоне частот 178,4-258,4 ГГц, где

1 - синтезатор частоты;

2 - опорный генератор;

- 3 - гетеродин;
- 4 - модуль компьютерный;
- 5 - модуль отображения и управления;
- 6 - устройство умножения и усиления;
- 7 - умножитель частоты на два;
- 8 - управляемый аттенюатор;
- 9 - полосовой фильтр СВЧ;
- 10 - усилитель СВЧ;
- 11 - модуль фильтров и преобразования напряжения (МФиПН);
- 12 - модуль автоматической регулировки мощности (АРМ);
- 13 - аналогово-цифровой преобразователь (АЦП);
- 14 - модуль управления и обработки сигналов (МУиОС);
- 15 - умножитель частоты на восемь;
- 16, 22 - направленные ответвители;
- 17, 23 - смесители на шестнадцатой гармонике опорного и измерительного каналов соответственно;
- 18, 24 - полосовые фильтры;
- 19, 25 - усилители промежуточной частоты (УПЧ);
- 20 - блок измерительный;
- 21 - выносной преобразователь СВЧ-сигнала.

Источником СВЧ-сигнала является синтезатор частоты 1, который генерирует сигнал в диапазоне частот от 11,15 до 16,15 ГГц. На синтезатор частоты 1 поступает сигнал частотой 100 МГц от опорного кварцевого генератора 2. Сигнал синтезатора поступает на модуль умножения и усиления 6, состоящий из умножителя частоты на два 7, управляемого аттенюатора 8, полосового фильтра 9 и СВЧ-усилителя 10. На выходе умножителя частота повышается от 22,3 до 32,3 ГГц. С помощью управляемого аттенюатора 8 устанавливается необходимый уровень мощности СВЧ-сигнала. Управляющие сигналы на аттенюатор 8 поступают от модуля АРМ 12. Полосовой фильтр СВЧ 9 служит для подавления частотных составляющих сигнала, лежащих за пределами полосы 22,3-32,3 ГГц, а усилитель СВЧ 10 - для усиления сигнала до уровня, необходимого для нормальной работы измерителя.

С выхода модуля умножения и усиления 6 сигнал поступает на умножитель частоты на восемь 15, на выходе которого формируется сигнал с частотой от 178,4 до 258,4 ГГц и уровнем мощности от -10 до -7 дБм, что превышает уровень мощности прототипа [2].

В умножителе частоты на гармониках 15 используется волновод сечением 1,1×0,55 мм, что соответствует диапазону частот 178,4-258,4 ГГц. Частота среза у данного волновода 137,52 ГГц. На вход умножителя частоты на гармониках 15 с модуля умножения и усиления 6 подается сигнал с шестой, седьмой и восьмой гармониками. Девятая и более высокие гармоники в заданный частотный диапазон не попадают. Далее направленный ответвитель 16 разделяет сигнал на измерительный и опорный.

Для переноса измерительного и опорного сигнала на промежуточную частоту 100 кГц используется гетеродин, работающий на частотах 11,1499-16,1499 ГГц. На один из входов гетеродина поступает сигнал частотой 100 МГц от опорного кварцевого генератора, другие выходы гетеродина подключены к смесителям на гармониках 17 и 23.

Модуль фильтров и преобразования напряжения 11 вместе с блоком питания, входящим в состав модуля компьютерного 4, создают необходимые уровни питающего напряжения для обеспечения нормальной работы узлов и модулей измерителя.

Таким образом, в измерительном блоке 20 формируется испытательный и опорный СВЧ-сигналы в диапазоне частот 178,4-258,4 ГГц; оцифровываются сигналы в АЦП 13, рассчитываются в МУиОС 14 и выводятся на дисплей модуля отображения и управления 5 частотные характеристики измеряемых параметров.

Выносной преобразователь 21 состоит из направленного ответвителя 22, смесителя на шестнадцатой гармонике 23, полосового фильтра 24 и усилителя промежуточной частоты 25 и служит для снятия информации о прошедшей через объект измерения волне и передачи измеренного сигнала в блок измерительный 20.

Используемый в изобретении смеситель на гармониках гетеродина относится к классу смесителей с субгармонической накачкой. Основой построения данных смесителей является пара антипараллельно включённых диодов с барьером Шоттки (ДБШ).

ВАХ ДБШ хорошо аппроксимируется выражением [3, с. 32]

$$I = I_s(e^{\gamma u} - 1), \quad (1)$$

где I_s - ток насыщения диода;

u - напряжение на диоде;

γ определяется по формуле

$$\gamma = \frac{q}{\eta k T}, \quad (2)$$

где q - заряд электрона;
 k - постоянная Больцмана;
 η - коэффициент идеальности ($\eta \approx 1$ для арсенидгаллиевых диодов);
 T - температура в Кельвинах.
 Суммарное мгновенное значение тока, протекающее через диоды

$$i = 2I_s sh(\gamma u). \quad (3)$$

Соответственно, дифференциальная проводимость пары диодов определяется как

$$\delta S = \frac{di}{du} = 2I_s ch(\gamma u). \quad (4)$$

На диоды подается напряжение, представляющее собой сумму сигналов радиочастоты и гетеродина

$$u(t) = U_0 \cos \omega_0 t + U_r \cos \omega_r t. \quad (5)$$

При условии $U_r \gg U_0$ дифференциальная проводимость пары диодов будет определяться преимущественно сигналом гетеродина и изменяться периодически с частотой сигнала гетеродина.

Выражение для дифференциальной проводимости, модулированной сигналом гетеродина, может быть представлено в виде ряда Фурье [4, с. 190]

$$\delta S(t) = 2\gamma I_s [J_0(\gamma U_r) + 2J_2(\gamma U_r) \cos 2\omega_r t + 2J_4(\gamma U_r) \cos 4\omega_r t \dots] \quad (6)$$

где $J_n(\gamma U_r)$ - модифицированная функция Бесселя порядка n .

В выражении (6) присутствуют только четные гармоники, что связано с симметричностью результирующей ВАХ диодной пары.

С учетом (6) выражение для k -й гармоники тока запишется как

$$\begin{aligned} i_k(t) &= 4\gamma I_s J_k(\gamma U_r) \cos k\omega_r t \cdot U_0 \cos \omega_0 t = \\ &= 2\gamma I_s J_k(\gamma U_r) U_0 [\cos(k\omega_r + \omega_0)t + \cos(k\omega_r - \omega_0)t]. \end{aligned} \quad (7)$$

Таким образом, в спектре выходного сигнала смесителя присутствуют гармоники с частотами $k\omega_r \pm \omega_0$.

Применение смесителя на гармониках гетеродина позволяет построить гетеродинный канал измерителя без умножителя частоты на гармониках и усилителя мощности сигнала, что позволяет добиться малых потерь преобразования без опасения возрастания шумов.

Для проведения измерений в диапазоне частот 178,4-258,4 ГГц расположение элементов 22, 23, 24, 25 в выносном преобразователе 21 (фиг. 1) предпочтительнее, так как это позволяет уменьшить количество используемых дорогостоящих СВЧ-элементов. В зависимости от ориентации выходов выносного преобразователя относительно объекта измерения можно измерять либо коэффициенты отражения $S_{11(22)}$ (фиг. 2), либо коэффициент передачи $S_{21(12)}$ (фиг. 3) СВЧ-сигнала. Схемы подключения объекта измерения к измерителю комплексных коэффициентов отражения и передачи представлены на фиг. 2 и 3, где

- 1 - блок измерительный;
- 2 - объект измерения;
- 3 - выносной преобразователь СВЧ-сигнала;
- 4 - согласованная нагрузка.

Для реализации заявленного принципа измерений комплексных коэффициентов отражения и передачи в диапазоне частот 118,1-178,4 ГГц используется устройство, блок-схема которого приведена на фиг. 4, где

- 1 - синтезатор частоты;
- 2 - опорный генератор;
- 3 - гетеродин;
- 4 - модуль компьютерный;
- 5 - модуль отображения и управления;
- 6 - устройство умножения и усиления;
- 7 - умножитель частоты на два;
- 8 - управляемый аттенюатор;
- 9 - полосовой фильтр СВЧ;
- 10 - усилитель СВЧ;
- 11 - модуль фильтров и преобразования напряжения;
- 12 - модуль автоматической регулировки мощности;
- 13 - аналогово-цифровой преобразователь;
- 14 - модуль управления и обработки сигналов;
- 15 - умножитель частоты на пять;
- 16, 22 - направленные ответвители;
- 17, 23, 26 - смесители на десятой гармонике;
- 18, 24, 27 - полосовые фильтры;
- 19, 25, 28 - усилители промежуточной частоты;

20 - блок измерительный;

21 - выносной преобразователь СВЧ-сигнала.

В данной схеме используется умножение сигнала синтезатора 11,81-17,84 ГГц в два и пять раз и, соответственно, применяются смесители на десятой гармонике для переноса информационного сигнала на промежуточную частоту (ПЧ). Умножитель частоты на пять 15, направленные ответвители 16, 22, смесители 17, 23, 27 реализованы на прямоугольных волноводах сечением 2,4×1,2 мм.

Основным отличием данной схемы измерителя от схемы, изображенной на фиг. 1, является наличие дополнительного канала обработки отраженного сигнала, позволяющего производить одновременные измерения комплексных коэффициентов передачи и отражения. Данный канал состоит из направленного ответвителя 22, смесителя на десятой гармонике 23, полосового фильтра 24, усилителя 25. Из выносного преобразователя исключается направленный ответвитель. Остальные узлы схемы идентичны описанным выше для диапазона 178,4-258,4 ГГц.

Сопоставительный анализ с прототипом показывает, что заявляемый измеритель отличается исключением одних и введением новых функциональных узлов, а именно в канале гетеродина не используются умножители частоты, что обеспечивает более высокий уровень мощности сигнала на входе смесителя на гармониках и, соответственно, приводит к уменьшению потерь преобразования без опасения возрастания шумов. Для выделения промежуточной частоты, равной 100 кГц, после смесителя используется полосовой фильтр. Таким образом, заявленный измеритель имеет более простую и дешевую конструкцию, что обеспечивается использованием измерительного блока и одного выносного преобразователя СВЧ, построенных на СВЧ-устройствах с доступной и недорогостоящей элементной базой.

Измерители комплексных коэффициентов отражения и передачи в миллиметровом диапазоне волн, в которых реализованы заявленные принципы построения их структуры, были разработаны и изготовлены в Научно-образовательном инновационном центре СВЧ-технологий и их метрологического обеспечения Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники. В качестве примера на фиг. 5 приведена фотография измерителя комплексных коэффициентов отражения и передачи в диапазоне частот 118,1-178,4 ГГц.

Литература.

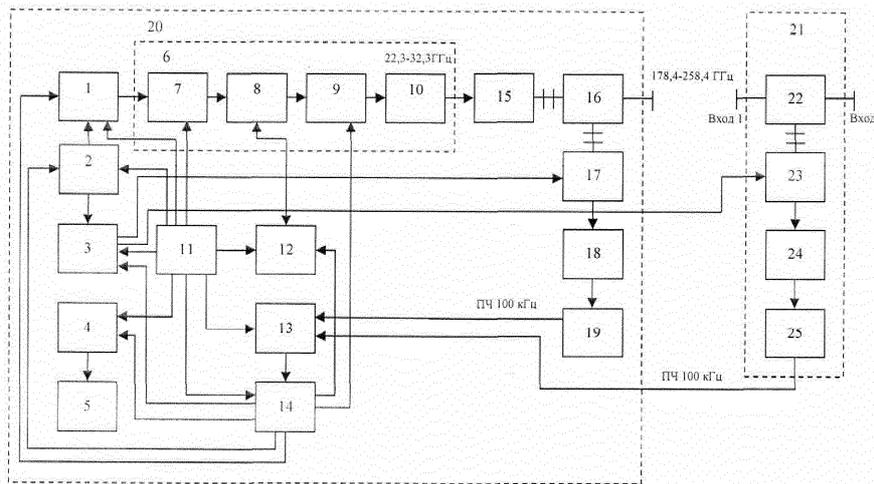
1. Гусинский, А.В. Векторные анализаторы цепей миллиметровых волн: монография. В 3 ч. Ч.3 (кн.1). Принципы построения и анализ схем векторных анализаторов цепей / А.В.Гусинский, Г.А. Шаров, А.М. Кострикин. – Минск: БГУИР, 2008, с.399-408.
2. OML INC., MILLIMETER WAVE VNA MODULE BROCHURE, 2016, с.10.
3. Розанов Б.А., Розанов С. Б. Приемники миллиметровых волн. – М.: Радио и связь, 1989. – 168 с., ил.
4. Эткин В. С., Берлин А. С., Бобро П. П. и др. Полупроводниковые параметрические усилители и преобразователи СВЧ. – М.: Радио и связь, 1983. – 304 с., ил.

ФОРМУЛА ИЗОБРЕТЕНИЯ

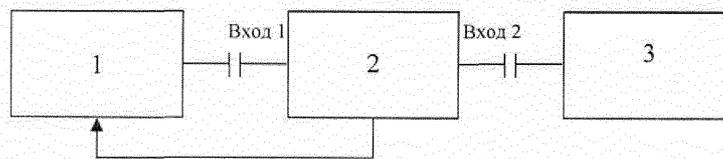
1. Измеритель комплексных коэффициентов передачи и отражения в диапазоне 178,4-258,4 ГГц, состоящий из блока измерительного и выносного преобразователя СВЧ-сигнала, блок измерительный содержит синтезатор частоты 11,15-16,15 ГГц, к входу которого подключен первый выход опорного кварцевого генератора 100 МГц, второй выход опорного кварцевого генератора подключен к входу гетеродина 11,1499-16,1499 ГГц; выход синтезатора 11,15-16,15 ГГц подключен к модулю умножения и усиления, который состоит из последовательно включенных умножителя частоты на два, управляемого аттенюатора, полосового фильтра СВЧ, усилителя СВЧ, при этом аттенюатор подключен к модулю автоматической регулировки мощности, а полосовой фильтр к модулю управления и обработки сигналов; выход модуля умножения и усиления подключен к умножителю частоты на восемь, который выполнен с возможностью подачи СВЧ-сигнала на вход первичного канала направленного ответвителя для ответвления сигнала в опорный канал: смеситель на шестнадцатой гармонике сигнала гетеродина, полосовой фильтр, усилитель промежуточной частоты, и передачи сигнала на СВЧ-выход блока измерительного; выходы гетеродина напрямую подключены к входам смесителей на шестнадцатой гармонике сигнала гетеродина, расположенных в опорном канале и в выносном преобразователе; модуль фильтров и преобразования напряжения подключен ко всем узлам и модулям измерителя, для которых необходимо питающее напряжение; к входам АЦП подключены выходы усилителей промежуточной частоты, выход АЦП соединён с модулем управления и обработки сигналов, который подключен к модулю компьютерному, который соединен с модулем отображения и управления; в выносном преобразователе расположен направленный ответвитель, входы первичного канала которого являются внешними входами преобразователя, к выходу направленного ответвителя подключен смеситель на шестнадцатой гармонике, на выходе промежуточной

частоты смесителя стоит полосовой фильтр, после которого следует усилитель промежуточной частоты.

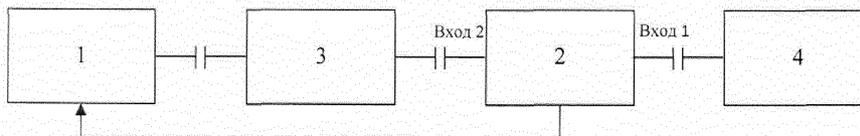
2. Измеритель комплексных коэффициентов передачи и отражения в диапазоне 118,1-178,4 ГГц, состоящий из блока измерительного и выносного преобразователя СВЧ-сигнала, блок измерительный содержит синтезатор частоты 11,81-17,84 ГГц, к входу которого подключен первый выход опорного кварцевого генератора 100 МГц, второй выход опорного кварцевого генератора подключен к входу гетеродина 11,8099-17,8399 ГГц; выход синтезатора 11,81-17,84 ГГц подключен к модулю умножения и усиления, который состоит из последовательно включенных умножителя частоты на два, управляемого аттенюатора, полосового фильтра СВЧ, усилителя СВЧ, при этом аттенюатор подключен к модулю автоматической регулировки мощности, а полосовой фильтр к модулю управления и обработки сигналов; выход модуля умножения и усиления подключен к умножителю частоты на пять, который выполнен с возможностью подачи СВЧ-сигнала на вход первичного канала направленного ответвителя для ответвления сигнала в опорный канал: смеситель на десятой гармонике сигнала гетеродина, полосовой фильтр, усилитель промежуточной частоты, и передачи сигнала на СВЧ-выход блока измерительного; выходы гетеродина напрямую подключены к входам смесителей на десятой гармонике сигнала гетеродина, расположенных в опорном канале и в выносном преобразователе; модуль фильтров и преобразования напряжения подключен ко всем узлам и модулям измерителя, для которых необходимо питающее напряжение; к входам АЦП подключены выходы усилителей промежуточной частоты, выход АЦП соединён с модулем управления и обработки сигналов, который подключен к модулю компьютерному, который соединен с модулем отображения и управления; в выносном преобразователе расположен смеситель на десятой гармонике, высокочастотный вход которого является внешним входом преобразователя, на выходе промежуточной частоты смесителя стоит полосовой фильтр, после которого следует усилитель промежуточной частоты.



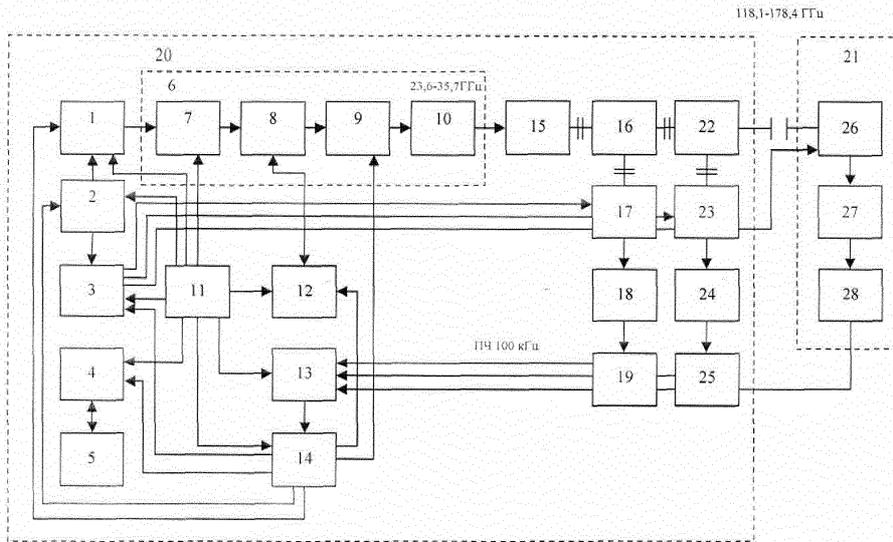
Фиг. 1



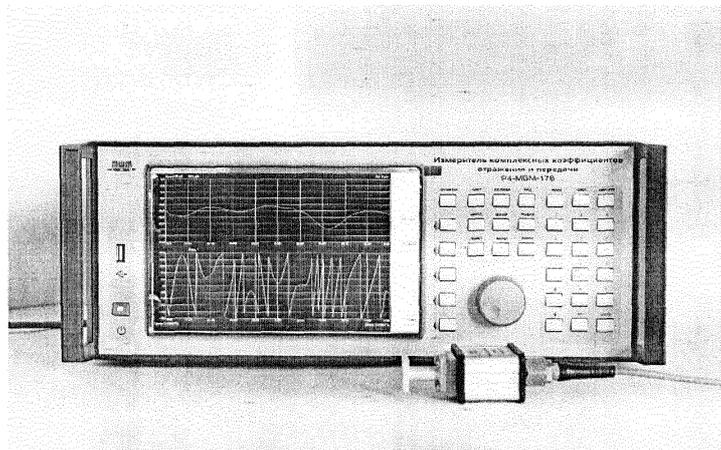
Фиг. 2



Фиг. 3



Фиг. 4



Фиг. 5