

УДК 621.372.852

DOI: 10.53297/18293336-2025.2-107

ПРИЕМНЫЙ МОДУЛЬ ПРИЕМНИКА ТЕРАГЕРЦОВОГО ДИАПАЗОНА

М.Ц. Айвазян, В.А. Варданян

Национальный политехнический университет Армении

В последнее время все большее внимание ученых в областях радиофизики, систем спутниковой связи, создания беспилотных транспортных средств, радиолокации и смежных областях занимает электромагнитное излучение в терагерцовом диапазоне волн. Практическое освоение этого диапазона может дать мощный импульс научным исследованиям в самых разных областях знаний таких как космическая связь, медицина, системы сотовой связи др. Терагерцовый диапазон открывает новые возможности для обеспечения широкополосных каналов. В терагерцовом диапазоне сравнительно легко можно создавать каналы связи с полосой пропускания в несколько десятков гигагерц.

В настоящее время подавляющее большинство радиотехнических систем используют радиоприемные устройства супергетеродинного типа, что обусловлено их высокой чувствительностью и избирательностью по соседнему каналу. В терагерцовом диапазоне потери в тракте сверхвысоких частот вносят заметный вклад в шум-фактор приемника, в связи с чем разработке квазиоптических устройств для сложения мощности сигнала и гетеродина уделяется значительное внимание.

Используемые в коротковолновой части терагерцового диапазона смесители сверхвысоких частот на диодах с барьером Шоттки требуют повышенной мощности гетеродина (≥ 10 мВт), однако большие потери в канале гетеродина существенно ограничивают применение подобных устройств. Поэтому интерес представляет использование интерферометрической схемы сложения. Это может быть интерферометр Маха-Цендера, который содержит два диэлектрических делителя луча, а также два волноводных уголка. Интерферометрическая схема сложения может быть усовершенствована за счет использования поляризационного интерферометра Майкельсона, применение которого позволяет существенно уменьшить размеры устройства.

В настоящей статье предложен приемный модуль приемника терагерцового диапазона, в котором используется поляризационный интерферометр Майкельсона.

Ключевые слова: терагерцовый диапазон, приемный модуль, уголковый отражатель, интерферометр Майкельсона.

Введение. В настоящей работе рассмотрена работа разработанного нами приемного модуля терагерцового диапазона на основе квадратного металлодиэлектрического волновода. Подавляющее большинство радиотехнических систем используют радиоприемные устройства супергетеродинного типа [1], что обусловлено их высокой чувствительностью и избирательностью по соседнему каналу. В терагерцовом диапазоне потери в тракте сверхвысоких частот (СВЧ) вносят заметный вклад в шум-фактор приемника, в связи с чем разработке квазиоптических устройств для сложения мощности сигнала и гетеродина уделяется значительное внимание. В простейшем случае устройство может быть выполнено на основе диэлектрического делителя луча (рис. 1).

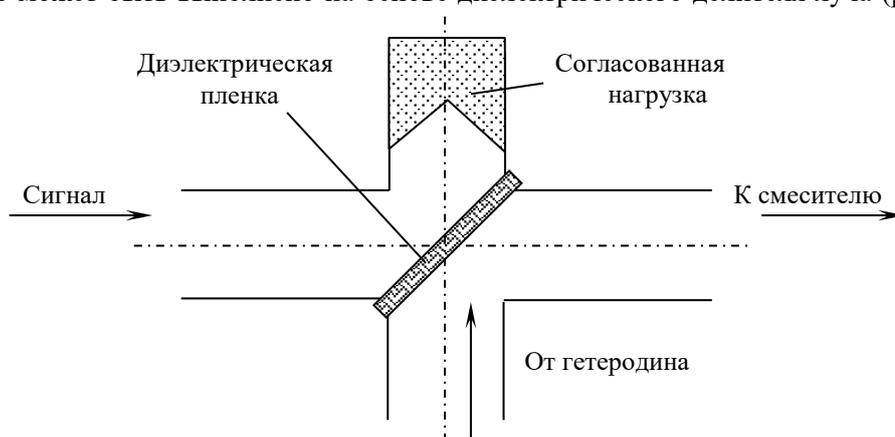


Рис. 1. Сложение мощности сигнала и гетеродина на основе диэлектрического делителя луча

Подобное устройство работает в широкой полосе частот ($\approx 60\%$), однако характеризуется большими потерями мощности гетеродина $\eta_r = 10 \lg[1 - (\eta_c + 2\eta_d)]$ дБ, чтобы обеспечить малые потери в канале сигнала η_c , как показано на рис. 2 (η_d – потери в делителе пучка). Если ограничиться значением потерь сигнала $\eta_r \leq 0,25$ дБ, то потери в канале гетеродина достигают величины 16 дБ.

Аналогичными характеристиками обладает также устройство сложения на основе крестообразного разветвления с поляризационной решеткой в диагональном сечении, которое позволяет гибко менять коэффициенты передачи в каналах сигнала и гетеродина путем поворота элементов решетки на угол α относительно плоскости поляризации в канале сигнала. Так как используемые в коротковолновой части терагерцового диапазона смесители СВЧ на диодах с барьером Шоттки требуют повышенной мощности гетеродина (≥ 10

мВт), то значительные потери в канале гетеродина существенно ограничивают применение подобных устройств.

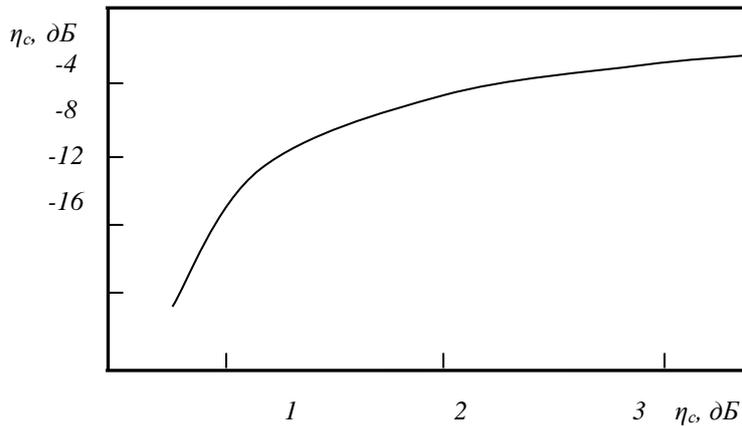


Рис. 2. Зависимость потерь в канале гетеродина от потерь в канале сигнала

терферометрической схемы сложения сигналов, которая впервые предложена и исследована в работе [1] для супергетеродинных приемников со сверхвысокой промежуточной частотой $f_{ПЧ} = (2 \div 10) ГГц$. Это может быть интерферометр Маха-Цендера, который содержит два диэлектрических делителя луча, а также два уголкового поворота (рис. 3).

Мощности сигнала и гетеродина поступают на входной диэлектрический делитель пучка 1 и затем на выходной делитель 2 по прямому каналу А-Д и через обводной канал А-В-С-Д, длины которых равны L_{AD} и L_{ABCD} соответственно. При этом решающее значение имеет разность путей $L = |L_{AD} - L_{ABCD}|$, которая определяет фазовые соотношения в системе.

Как показано в работе [1], коэффициенты передачи по мощности в каналах “Вход сигнала – Смеситель” η_c и “Вход гетеродина – смеситель” η_r определяются следующими выражениями:

$$\begin{aligned} \eta_c &= 1/2(1 - \cos k_0 L), \\ \eta_r &= 1/2(1 + \cos k_0 L), \end{aligned} \quad (1)$$

где $k_0 = 2\pi/\lambda_0$.

Если разность хода составляет половину длины волны промежуточной частоты $L = \lambda_{ПЧ}/2$ (полуволновой интерферометр), то коэффициенты передачи по каналам сигнала и гетеродина одновременно достигают максимального значения, а входы сигнала и гетеродина оказываются полностью развязанными-

ми, что дает существенный выигрыш при использовании подобного устройства сложения в составе супергетеродинного радиометра [1].

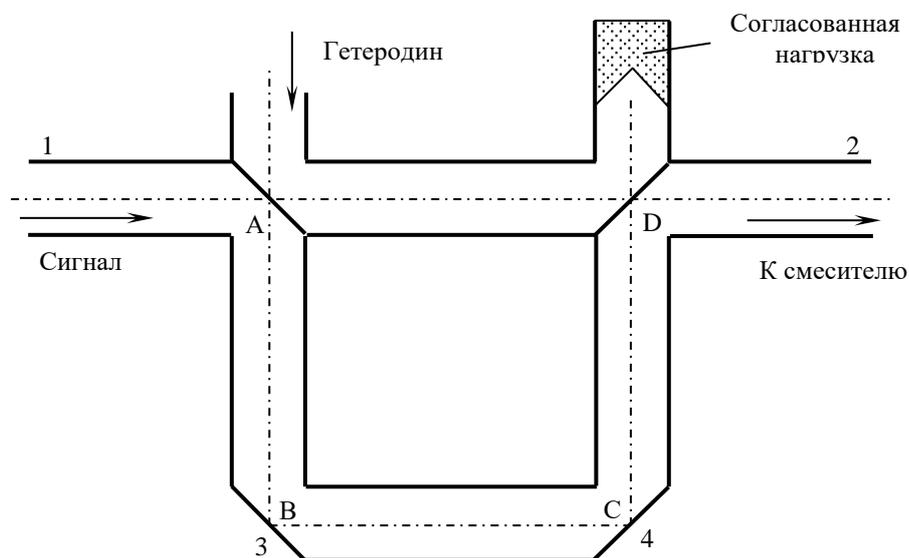


Рис. 3. Устройство сложения мощности на основе интерферометра Маха-Цендера [1]

Более того, как впервые отмечено в работе [2], полуволновой интерферометр также обеспечивает подавление шумов гетеродина по аналогии с балансной схемой смесителя, которая широко применяется в СВЧ приемниках [3]. Однако, в отличие от традиционных балансных схем, эффективность работы которых зависит от идентичности двух смесительных диодов, в рассматриваемом случае высокая степень подавления шумов гетеродина (не менее 10 дБ) достигается при использовании одного смесительного диода [2], а шумы приемника определяются в основном шумами усилителя промежуточной частоты.

Интерферометрическая схема сложения сигналов может быть значительно усовершенствована за счет использования поляризационного интерферометра Майкельсона [3, 4], применение которого позволяет существенно уменьшить размеры устройства. В этом случае устройство (рис. 4) содержит поляризующие решетки 1, 2 и 5, а также двугранные 90° уголки отражатели 3 и 4, причем элементы решетки 1 и 5 ориентированы одинаково, а решетка 2 и двугранные отражатели повернуты вокруг оси СВЧ на 45° относительно элементов решеток 1 и 5.

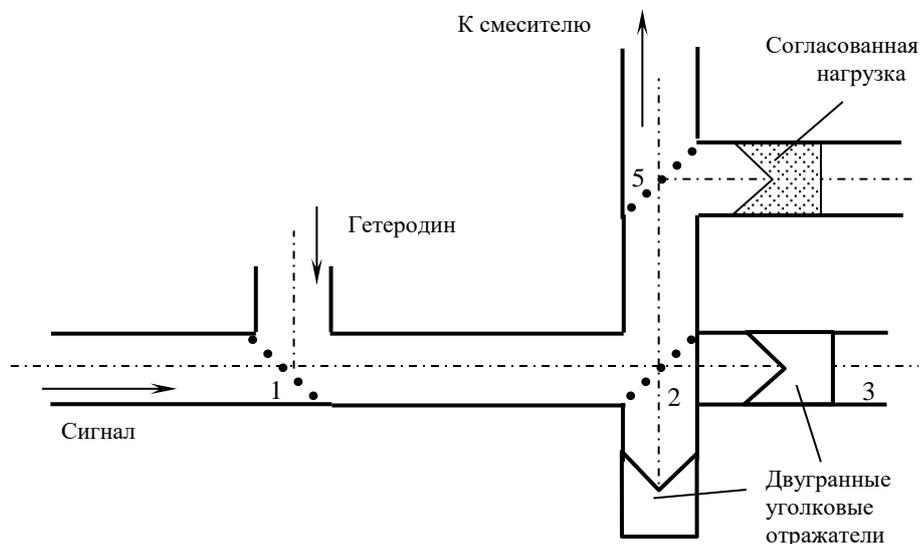


Рис. 4. Устройство сложения мощности на основе интерферометра Майкельсона [4]

Решетка 1 на входе интерферометра обеспечивает сложение колебаний сигнала и гетеродина, которые поляризованы в ортогональных плоскостях. При этом их мощность поровну делится на решетке 2. Плоскость поляризации составляющих поля, прошедших сквозь решетку при отражении от двугранного уголкового отражателя 3, поворачивается на 90° , а затем, после отражения от решетки 2, поступает на вход смесительного диода. Плоскость поляризации колебаний сигнала и гетеродина, отраженных от решетки 2, поворачивается на 90° при отражении от двугранного уголка 4, в связи с чем указанные составляющие также поступают на вход смесительного диода после прохождения решетки 2.

На входе смесительного диода колебания, в общем случае, поляризованы эллиптически и становятся линейно поляризованными при разности хода, кратной половине длины волны в сверхразмерном волноводе $L = L_{3,2} - L_{4,2} = \pm p\lambda_0/2$, где $L_{3,2}$ и $L_{4,2}$ – расстояние от уголкового отражателя 4 и 3 до решетки 2 соответственно; p – целое число. При четном p поляризация волны на выходе интерферометра параллельна поляризации на входе, при нечетном p – ортогональна ей, а при разности хода, кратной четверти длины волны $L = \pm(2p+1)\lambda_0/4$, волна на выходе поляризована по кругу. Поэтому разность хода в плечах интерферометра для колебаний гетеродина выбирается равной це-

лomu числу длин волн, а для сигнала – полуцелому числу длин волн. Благодаря этому они оказываются поляризованными в одной плоскости в выходном плече интерферометра на входе смесительного диода, причем шумы гетеродина поляризованы ортогонально сигналу и отражаются решеткой 5 в плечо согласованной нагрузки. В результате разность хода, равная половине длины волны колебаний промежуточной частоты $L = \lambda_{ПЧ}/2$, в данном случае реализуется при вдвое меньшей длине отрезка сверхразмерного волновода.

Работа устройства иллюстрируется интерферограммой на рис. 5, где по горизонтальной оси отложена разность хода лучей в каналах интерферометра, а по вертикальной – коэффициент передачи в каналах сигнала и гетеродина. Также показан участок интерферограммы, который иллюстрирует подавление шумов гетеродина, отстоящих от центральной частоты на величину промежуточной частоты.

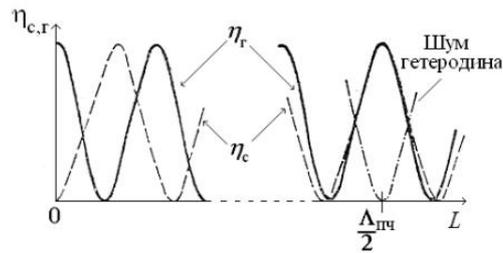


Рис. 5. Интерферограмма работы поляризационного интерферометра Майкельсона

При этом следует отметить, что выражения для коэффициентов передачи мощности по каналам сигнала и гетеродина справедливы только в одной точке по частоте, в то время как шум гетеродина распределен в некоторой полосе, и для оценки коэффициента подавления необходимо воспользоваться выражениями для коэффициентов передачи, приведенными в работах [3, 4]:

$$\eta_g = \frac{1}{2} \left(1 + \cos \pi \frac{\Delta f_g}{f_{ПЧ}} \right), \quad (2)$$

$$\eta_c = \frac{1}{2} \left(1 + \cos \pi \frac{\Delta f_c}{f_{ПЧ}} \right),$$

где Δf_g и Δf_c – частотные расстройки колебаний гетеродина и сигнала относительно их центральных частот f_g и f_c ; $f_{ПЧ}$ – центральная частота усилителя промежуточной частоты (УПЧ), а выражение для коэффициента передачи шумов гетеродина имеет вид

$$\eta_{ш} = \frac{1}{2} \left(1 - \cos \pi \frac{\Delta f_{ш}}{f_{ПЧ}} \right), \quad (3)$$

$f_{ш}$ – частотная расстройка составляющей спектра шумов относительно частоты $f_c \pm F_{ПЧ}$.

Интегрируя коэффициенты передачи по мощности в каналах сигнала и гетеродина в полосе пропускания УПЧ $f_{ПЧ}$, в работах [5, 6] получено выражение для коэффициента подавления шумов гетеродина в следующем виде:

$$S_{ш} = \frac{1}{2} \left[\frac{\Delta f_{ПЧ}}{2f_{ПЧ}} + \frac{1}{\pi} \sin \pi \frac{\Delta f_{ПЧ}}{2f_{ПЧ}} \right] * \left[\frac{\Delta f_{ПЧ}}{2f_{ПЧ}} - \frac{1}{\pi} \sin \pi \frac{\Delta f_{ПЧ}}{2f_{ПЧ}} \right]^{-1} . \quad (4)$$

Зависимость коэффициента подавления от относительной полосы пропускания на промежуточной частоте $\overline{\Delta f} = \frac{\Delta f_{ПЧ}}{f_{ПЧ}}$ приведена на рис. 6.

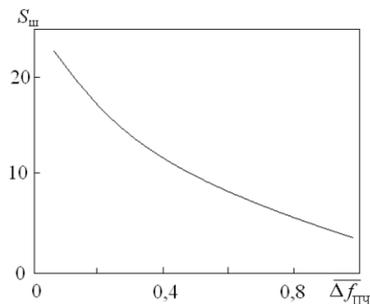


Рис. 6. Зависимость коэффициента подавления шумов гетеродина от относительной полосы пропускания УПЧ

Результаты исследования. Как видно, даже для радиолокационной станции (РЛС) со сравнительно невысоким разрешением по дальности ($\Delta R \geq 10$ м), когда относительная полоса пропускания в приемниках не превышает $\overline{\Delta f} \leq 10^{-2}$, подавление шумов гетеродина $S_{ш}$ может превышать 20 дБ. Тем не менее, даже с учетом уменьшения коэффициента подавления шумов гетеродина, применение интерферометрического устройства сложения по-прежнему выгодно с точки зрения получения малых потерь в каналах сигнала и гетеродина одновременно.

Приведем схему разработанного нами приемного модуля терагерцового диапазона на основе квадратного металлодиэлектрического волновода (рис.7).

Другим ограничивающим фактором является разница в ослаблении сигналов в плечах интерферометра за счет неодинаковой длины сверхразмерных волноводов [7], что характеризуется величиной дифференциального ослабления в виде отношения затухания в обводном и прямом каналах (рис. 3): $\eta_{д.} = \eta_{ABCD} / \eta_{AD}$. В этом случае мощность сигнала ослабляется как

$\eta_c = 10 \lg [2/(1+\eta_d^2)] \text{ дБ}$, а плоскость поляризации поворачивается на угол $\beta_{II} = \text{tg}^{-1}[(1-\eta_d) / (1+\eta_d)] \text{ рад}$.

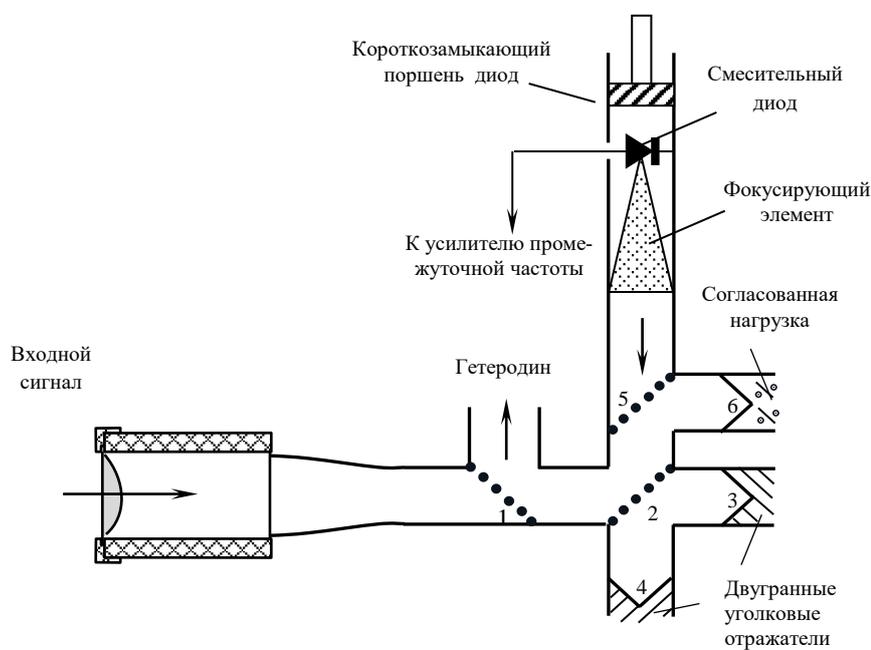


Рис. 7. Схема входного модуля приемника терагерцового диапазона с рупорно-линзовой антенной на основе интерферометра Майкельсона

Как видно из рис. 7, на входе интерферометра Майкельсона установлена разработанная нами рупорно-линзовая антенна. На выходе интерферометра установлен фокусирующий элемент, который обеспечивает подачу приемного сигнала и сигнала гетеродина на смесительный диод [8].

Заключение. Разработан и предложен приемный модуль терагерцового диапазона. На входе модуля установлена рупорно-линзовая антенна. Для смешивания принятого сигнала с сигналом гетеродина используется интерферометр Майкельсона. Смеситель выполнен на диоде с барьером Шоттки.

Литература

1. Федосеев Л.И., Куликов Ю.Ю. Супергетеродинные радиометры миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов волн // Радиотехника и электроника. – 1971. – Т. 16, № 4. – С. 554-560.
2. Дрягин Ю.А., Кукин Л.М., Лубяко Л.В. К вопросу о подавлении шумов гетеродина в супергетеродинных приемниках с высокой промежуточной частотой // Радиотехника и электроника. – 1974. – Т. 19, № 8. – С. 1779-1780.

3. **Яновский М.С., Князьков Б.Н.** Квазиоптические поляризационные интерферометры смесителей приемников миллиметровых и субмиллиметровых волн // Изв. вузов. Радиоэлектроника. – 1977. – Т. 20, № 11. – С. 35-41.
4. **Безбородов В.И., Князьков Б.Н., Кулешов Е.М., Яновский М.С.** Квазиоптический тракт супергетеродинного приемника с отдельным приемом полос // Изв. вузов. Радиоэлектроника. – 1989. – Т. 32, № 3. – С. 29-34.
5. **Айвазян М.Ц.** Фокусирующий элемент для электрооптического модулятора субмиллиметрового диапазона волн // Вестник ГИУА (Политехник): Сборник научных и методических статей. – 2010. – Том 2, № 1. – С.191–193.
6. **Айвазян М.Ц., Варданян В.А.** Волноводные переходы для терагерцового диапазона // Вестник НПУА: Информационные технологии, электроника, радиотехника. - 2023.- № 1. - С. 106-114.
7. **Айвазян М.Ц., Варданян В.А.** Волноводно-линзовые переходы терагерцового диапазона // Известия НАН Армении. Физика.- 2024.- Т. 59, № 2.- С. 242–247.
8. **Айвазян М.Ц., Варданян В.А.** Рупорно–линзовая антенна терагерцового диапазона на основе волновода класса “полый диэлектрический канал” // Вестник НПУА: Информационные технологии, электроника, радиотехника. - 2024.- № 1. - С. 71-81.

*Поступила в редакцию 24.10.2025.
Принята к опубликованию 29.01.2026.*

ՏԵՐԱՀԵՐԳԱՅԻՆ ՀԱՃԱՆԱԿԱՆՈՒԹՅԱՆ ԸՆԴՈՒՆԻՉԻ ԸՆԴՈՒՆՈՂ ՄՈԴՈՒԼ

Մ.Ց. Այվազյան, Վ.Ա. Վարդանյան

Վերջին շրջանում տերահերցային տիրույթում էլեկտրամագնիսական ճառագայթումն ավելի ու ավելի է ուշադրություն գրավում ռադիոֆիզիկայի, արբանյակային կապի համակարգերի, անօդաչու սարքերի մշակման, ռադարային և հարակից ոլորտների գիտնականների շրջանում: Այս տիրույթի գործնական օգտագործումը կարող է հզոր խթան հաղորդել գիտական հետազոտությունների լայն շրջանակի ոլորտներում, ինչպիսիք են տիեզերական կապը, բժշկությունը, բջջային կապի համակարգերը և այլն: Տերահերցային տիրույթը բացում է լայնաշերտ կապուղիներ ապահովելու նոր հնարավորություններ: Տերահերցային տիրույթում հեշտ է ստեղծել մի քանի տասնյակ գիգահերցային թողունակությամբ կապի ալիքներ:

Ներկայումս ռադիոտեխնիկայի համակարգերի մեծ մասը օգտագործում է սուպերհետերոդինային ընդունիչներ՝ դրանց բարձր զգայնության և հարակից ալիքների ընտրողականության շնորհիվ: Տերահերցային տիրույթում կապուղիների կորուստները զգալիորեն նպաստում են ընդունիչի աղմուկի ցուցանիշին: Հետևաբար, զգալի ուշադրություն է դարձվում ազդանշանի և տեղային օսցիլյատորի հզորության համատեղման համար քվազիօպտիկական սարքերի մշակմանը:

Տերահերցային տիրույթի կարճալիք հատվածում օգտագործվող Շոտկի-արգելապատնեշային դիոդային միկրոալիքային խառնիչները պահանջում են բարձր տեղային տատանողական հզորություն (≥ 10 մՎտ), և տեղային հետերոդինի

ազդանշանի զգալի կորուստները սահմանափակում են նման սարքերի օգտագործումը: Հետևաբար, ինտերֆերաչափային համակցող սխեմայի օգտագործումը մեծ հետաքրքրություն է ներկայացնում: Սա կարող է լինել Մախ-Չենդերի ինտերֆերաչափը, որը պարունակում է երկու դիէլեկտրիկ ճառագայթային բաժանիչներ և երկու անկյունակներ: Ինտերֆերաչափման սխեման կարող է զգալիորեն բարելավվել՝ օգտագործելով բևեռացնող Մայքելսոնի ինտերֆերաչափը, որը թույլ է տալիս զգալիորեն կրճատել սարքի չափը:

Առաջարկվում է տերահերցային տիրույթի ընդունիչի համար ընդունող մոդուլ՝ օգտագործելով Մայքելսոնի բևեռացնող ինտերֆերաչափը:

Առանցքային բառեր. տերահերցային տիրույթ, ընդունող մոդուլ, անկյունային անդրադարձիչ, Մայքելսոնի ինտերֆերաչափը:

A RECEIVING MODULE FOR A TERAHERTZ RANGE RECEIVER

M.Ts. Ayvazyan, V.A. Vardanyan

Recently, electromagnetic radiation in the terahertz range has attracted increasing attention of scientists in the fields of radiophysics, satellite communication systems, unmanned vehicle development, radar, and related fields. Practical exploitation of this range could provide a powerful impetus to scientific research in a wide range of fields, such as space communications, medicine, cellular communication systems, and many others. The terahertz range opens up new possibilities for providing broadband channels. In the terahertz range, it is relatively easy to create communication channels with a bandwidth of several tens of gigahertz.

Currently, most radio engineering systems use superheterodyne receivers due to their high sensitivity and adjacent channel selectivity. In the terahertz range, losses in the microwave path significantly contribute to the receiver's noise figure. Therefore, considerable attention is being paid to the development of quasi-optical devices for combining the signal and local oscillator power.

Schottky-barrier diode microwave mixers used in the shortwave portion of the terahertz range require high local oscillator power (≥ 10 mW), and significant losses in the local oscillator channel significantly limit the use of such devices. Therefore, the use of an interferometric combining circuit is of considerable interest. This could be a Mach-Zehnder interferometer, which contains two dielectric beam splitters and two angular bends. The interferometric combining circuit can be significantly improved by using a polarizing Michelson interferometer, which allows for a significant reduction in the device size.

This article proposes a receiving module for a terahertz receiver using a polarizing Michelson interferometer.

Keywords: terahertz range, receiving module, corner reflector, Michelson interferometer.