

УДК 621.396.962.2

ТЕРАГЕРЦОВЫЕ СМЕСИТЕЛИ НА ОСНОВЕ ИНТЕРФЕРОМЕТРА МАХА-ЦЕНДЕРА

А.А. Аветисян

Национальный политехнический университет Армении

Рассмотрены общие принципы работы и преимущества применения интерферометра Маха-Цендера в качестве смесителя супергетеродинного приемника в терагерцовом диапазоне. Чувствительность существующих приемников терагерцового диапазона существенно ниже по сравнению с чувствительностью приемников инфракрасного и радиодиапазонов. Решение большого количества важных задач, таких как радиоастрономические наблюдения, диагностика высокотемпературной плазмы, исследования атмосферы Земли, радиолокация и т.д., во многом связано с исследованием излучения терагерцового диапазона. В сантиметровом диапазоне лучшими на сегодняшний день являются приемники прямого усиления на транзисторах, а в инфракрасном диапазоне рекордные характеристики имеют квантовые фотоприемники на основе легированных полупроводников. В коротковолновой части миллиметрового диапазона потери в тракте сверхвысоких частот (СВЧ) вносят заметный вклад в шумовые характеристики приемника, в связи с чем разработке устройств для сложения мощности сигнала и гетеродина уделяется значительное внимание. Однако на частотах выше 1 ТГц их шумовая температура резко растет. Смесители на основе диодов с барьером Шоттки работают в терагерцовом диапазоне, но их чувствительность часто бывает недостаточной для практических применений, а требуемую большую мощность гетеродина в коротковолновой части этого диапазона трудно реализовать даже в лабораторных условиях. Таким образом, проблема практической реализации чувствительных и широкополосных приемников в терагерцовом диапазоне неразрывно связана с поиском новых альтернативных механизмов преобразования частоты. Одним из перспективных направлений в этой области является использование интерферометрических систем. В настоящей работе исследуется работа интерферометра Маха-Цендера, выполненного на основе квадратного металлодиэлектрического волновода. Показано, что в отличие от традиционных схем, эффективность работы которых зависит от идентичности двух смесительных диодов, в этом случае высокая степень подавления шумов гетеродина достигается при использовании только одного смесительного диода, вследствие чего коэффициент шума радиоприемника принимает относительно низкое значение. Подобный подход, особенно в терагерцовом диапазоне, является более перспективным и независимым.

Ключевые слова: терагерцовый диапазон, смесители терагерцового диапазона, волноводы, металлодиэлектрические волноводы, интерферометр Маха-Цендера.

Введение. Терагерцовый диапазон электромагнитных волн является одним из наименее освоенных [1]. Это связано, в основном, с тем, что в этой области неудовлетворительно работают как радиофизические методы со стороны более длинных волн, так и оптические методы со стороны более коротких волн. В настоящее время большинство радиотехнических систем используют

радиоприемные устройства супергетеродинного типа с применением балансных смесителей, что обусловлено их высокой чувствительностью и избирательностью по соседнему каналу [2]. Работа смесителя предполагает одновременную подачу принятого сигнала и колебания гетеродина [3] по одному и тому же каналу, в котором установлен нелинейный элемент, в нашем случае - диод(ы).

Сложение мощности сигнала и гетеродина в терагерцовых супергетеродинных приемниках. В простейшем случае устройство может быть выполнено на основе диэлектрического делителя луча (рис. 1).

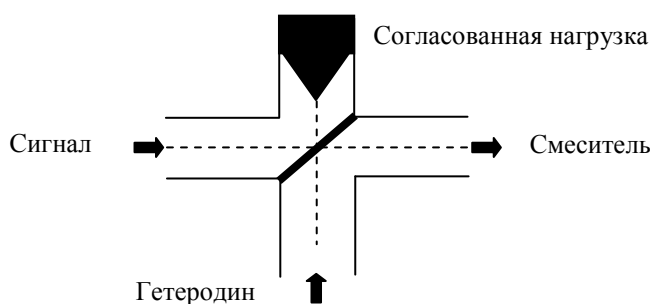


Рис. 1. Сложение мощности сигнала и гетеродина на основе диэлектрического делителя луча

Подобное устройство работает в широкой полосе частот (около 60%), но характеризуется значительными потерями мощности гетеродина [3]:

$$\eta_c = 10 \lg(1 - (\eta_c + 2\eta_o)) \text{ дБ}, \quad (1)$$

где η_c η_c η_o - потери гетеродина, сигнала и делителя.

Для того чтобы обеспечить малые потери в канале сигнала, сократить потери мощности сигнала $\eta_c \leq 0,25 \text{ дБ}$, потери в канале гетеродина должны достичь величины 16 дБ.

Интерферометр Маха-Цендера. Значительный интерес представляет использование интерферометрической схемы сложения, которая предложена и исследована для супергетеродинных приемников со сверхвысокой промежуточной частотой $f_{nc} = (2 \div 10) \text{ ГГц}$ [4]. Подобное устройство представляет собой интерферометр Маха-Цендера (состоящий из металло-диэлектрического волновода) и содержит два диэлектрических делителя луча 1 и 2, а также два уголкового отражателя 3 и 4 (СН - согласованная нагрузка). На рис. 2 показана принципиальная блок-диаграмма интерферометра Маха-Цендера. Мощности сигнала и гетеродина поступают на входной диэлектрический делитель пучка 1 и затем на выходной делитель 2 по прямому

каналу A-D и через обводной канал A-B-C-D, длины которых равны l_{ABCD} и l_{AD} соответственно.

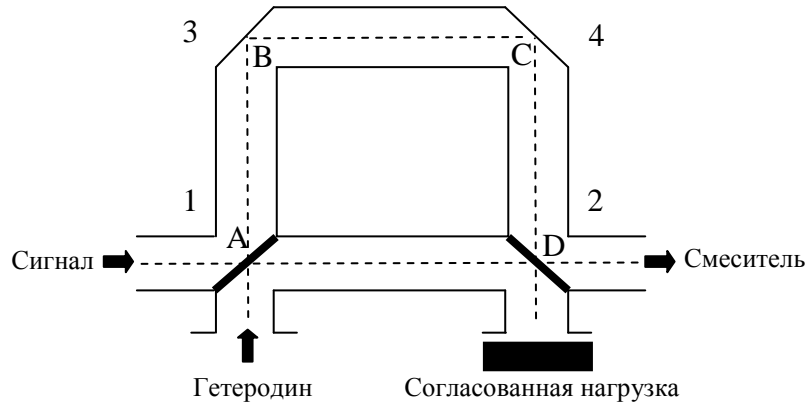


Рис. 2. Устройство сложения мощности на основе интерферометра Маха-Цендера

Фазовые сдвиги в системе имеют решающее значение и определяются при помощи выражения $L = (l_{ABCD} - l_{AD})$. Коэффициенты передачи по мощности в каналах “Вход сигнала – смеситель” η_c и “Вход гетеродина – смеситель” η_z определяются следующим образом:

$$\eta_c = \frac{1}{2}(1 - \cos k_0 L); \quad \eta_z = \frac{1}{2}(1 + \cos k_0 L), \quad (2)$$

где $k_0 = 2\pi/\lambda_0$ - волновое число.

Если разность хода составляет половину длины волны промежуточной частоты $L = \lambda_{пч}/2$ (полуволновый интерферометр), то коэффициенты передачи по каналам сигнала и гетеродина одновременно достигают максимального значения, а входы сигнала и гетеродина оказываются полностью развязанными, что дает существенный выигрыш при применении такового устройства в составе супергетеродинного приемника. Более того, полуволновый интерферометр также обеспечивает подавление шумов гетеродина по аналогии со схемой смесителя [4], которая широко применяется в СВЧ приемниках [5]. Но, в отличие от традиционных балансных схем, в рассматриваемом случае высокая степень подавления шумов гетеродина (≤ 10 дБ) достигается при использовании одного смесительного диода [4], а шумы приемника определяются в основном шумами усилителя промежуточной частоты. При этом следует отметить, что выражения (2) 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 следующими выражениями:

$$\eta_z = \frac{1}{2} \left(1 + \cos \pi \frac{\Delta f_z}{\Delta f_{nc}} \right), \quad (3)$$

$$\eta_c = \frac{1}{2} \left(1 + \cos \pi \frac{\Delta f_c}{\Delta f_{nc}} \right). \quad (4)$$

Здесь Δf_z и Δf_c – соответственно частотные расстройки колебаний гетеродина и сигнала относительно их центральных частот f_z и f_c , а f_{nc} – центральная частота усилителя промежуточной частоты (УПЧ).

Выражение для коэффициента передачи шумов гетеродина имеет вид

$$\eta_u = \frac{1}{2} \left(1 + \cos \pi \frac{\Delta f_u}{\Delta f_{nc}} \right), \quad (5)$$

где Δf_u – частотная расстройка спектра шумов относительно частоты $\Delta f_u \pm F_{nc}$.

В работе [6] приводится выражение для коэффициента подавления шумов гетеродина в следующем виде:

$$S_u = \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta f_{nc}}{2f_{nc}} + \frac{1}{\pi} \sin \pi \frac{\Delta f_{nc}}{2f_{nc}} \right) \left(\frac{\Delta f_{nc}}{2f_{nc}} - \frac{1}{\pi} \sin \pi \frac{\Delta f_{nc}}{2f_{nc}} \right)^{-1}. \quad (6)$$

Экспериментальные результаты. На рис. 3 приведена зависимость коэффициента подавления от относительной полосы пропускания на промежуточной частоте $\Delta f = \Delta f_{nc} / f_{nc}$ [2].

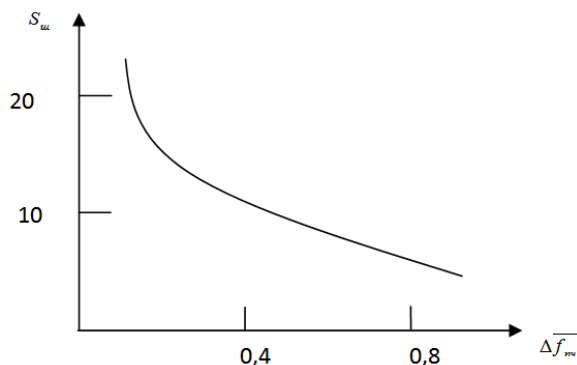


Рис. 3. Зависимость коэффициента подавления шумов гетеродина от относительной полосы пропускания УПЧ

Как видно из рисунка, даже когда относительная полоса пропускания в приемниках не превышает Δf_{nc} , подавление шумов гетеродина S_u может превышать 20 дБ. Однако в радиолокационных станциях с большим

разрешением по дальности этот коэффициент подавления существенно падает, вследствие чего следует стремиться к увеличению промежуточной частоты. Но даже с учетом уменьшения коэффициента подавления шумов гетеродина применение такого интерферометрического устройства сложения по-прежнему выгодно с точки зрения получения малых потерь в каналах сигнала и гетеродина одновременно [7].

Заключение. Таким образом, учитывая относительно низкие шумовые характеристики и технологическую целесообразность по сравнению с классическими схемами, в терагерцовом диапазоне применение интерферометра Маха-Цендера на основе металлодиэлектрического волновода в качестве смесителя супергетеродинного приемника является достаточно хорошим решением.

Литература

1. **Шаров Г.А.** Волноводные устройства сантиметровых и миллиметровых волн. – М.: Горячая линия – Телеком, 2016. – 639 с.
2. Complete set of waveguide elements for 120-180 GHz band / **R.S. Avagian, K.R. Agababian, M.Ts. Ayvazyan, et al** // Proceedings of the 16-th International Conference on Infrared and Millimeter Waves.- Lausanne, 1991.- P. 642-643.
3. Квазиоптические антенно-фидерные системы / Под ред. **Г.И. Хлопова.** – Харьков: ИПП “Контраст”, 2013. – 408 с.
4. **Федосеев Л.И., Куликов Ю.Ю.** Супергетеродинные радиометры миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов волн // Радиотехника и электроника. – 1971. – Т. 16, № 4. – С. 554-560.
5. **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.
6. **Розанов Б.А., Розанов С.Б.** Приемники миллиметровых волн. – М.: Радио и связь, 1989. – 168 с.
7. **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.

*Поступила в редакцию 20.09.2016.
Принята к опубликованию 09.12.2016.*

ՄԱԽ-ՑԵՆՂԵՐԻ ԻՆՏԵՐՖԵՐԱԶԱՓԻ ՀԻՄՔՈՎ ՏԵՐԱՀԵՐԳԱՅԻՆ ԽԱՌՆԻՉՆԵՐ

Հ.Ա. Ավետիսյան

Ուսումնասիրված են Մախ-Ցենղերի ինտերֆերազափի աշխատանքի սկզբունքը, կիրառությունը և առավելությունը՝ որպես տերահերցային տիրույթում սուպերհետերոդինային ընդունիչի հաճախականային խառնիչ: Տերահերցային տիրույթի ընդունիչների զգայնությունը բավականին ցածր է՝ համեմատած ինֆրակարմիր և ռադիոտիրույթների ընդունիչների հետ: Մեծ թվով կարևոր խնդիրների լուծումները, ինչպիսիք են՝ ռադիոաստղագիտական, բարձրջերմաստիճանային պլազմայի, մթնոլորտի, ռադիոլուկացիոն խնդիրների ուսումնասիրությունները և այլն, հիմնականում կապված են տերահերցային տիրույթի ուսումնասիրման հետ: Հարևան սանտիմետրային տիրույթում լավագույնը ներկայումս տրանզիստորներով ուղղակի ուժեղացմամբ ընդունիչներն են, իսկ ինֆրակարմիր տիրույթում ռեկորդային ցուցանիշներ ունեն քվանտային ֆոտոընդունիչները և ճառագայթաչափները, որոնց հիմքը լեզվով կիսահաղորդիչներն են: Միլիմետրային տիրույթի կարճալիքային տեղամասում գերբարձր հաճախականային կորուստները պատճառ են դառնում ընդունիչի աղմկային բնութագրերի վատթարացման, ուստի անհրաժեշտություն է առաջանում մեծ ուշադրություն դարձնել հետերոդինի և ազդանշանի հզորության բաշխմանը: Սակայն 1 S<g>-ից բարձր հաճախականությունների դեպքում վերջիններիս աղմկային ջերմաստիճանը կտրուկ բարձրանում է: Շոտկիի արգելքով աշխատող դիոդների հիմքով խառնիչներն աշխատում են տերահերցային տիրույթում, բայց նրանց զգայնությունը հաճախ բավարար չի լինում կիրառության տեսանկյունից, իսկ այս տիրույթի կարճալիքային հատվածում հետերոդինից պահանջվող մեծ հզորությունը դժվար է իրականացնել նույնիսկ լաբորատոր պայմաններում: Այս խնդիրների լուծման համար հեռանկարային է ինտերֆերազափական համակարգերի կիրառումը: Աշխատանքում ուսումնասիրված է ուղղանկյուն մետաղդիլեկտրիկական ալիքատարներով իրականացված Մախ-Ցենղերի ինտերֆերազափի աշխատանքը: Տույց է տրված, որ, ի տարբերություն ավանդական բալանսային սխեմաների, որոնց աշխատանքի արդյունավետությունը խիստ կախված է երկու խառնիչային դիոդների նույնականությունից, այս դեպքում հետերոդինից առաջացած աղմուկները ճնշվում են միայն մեկ խառնիչային դիոդով, ինչի շնորհիվ ռադիոընդունիչի աղմուկի գործակիցն ընդունում է հարաբերականորեն ցածր արժեք: Նման մոտեցումը ավելի հեռանկարային է և անկախ, հատկապես տերահերցային տիրույթում:

Առանցքային բաներ. տերահերցային տիրույթ, տերահերցային խառնիչներ, ալիքատարներ, մետաղ-դիլեկտրական ալիքատարներ, Մախ-Ցենղերի ինտերֆերազափ:

TERAHERTZ MIXERS BASED ON THE MACH-ZEHNDER INTERFEROMETER

H.A. Avetisyan

The general principles of operation and the advantages of using a Mach-Zehnder interferometer as a mixer of superheterodyne receiver in the terahertz range are considered. The sensitivity of existing terahertz receivers is significantly lower than the infrared and radio ranges. The solution of a large number of important tasks, such as radio astronomic observations, high-temperature plasma diagnostics, the study of the Earth's atmosphere, radar, etc, is largely connected with the research of the radiation of the terahertz range. In the next, the centimeter range, the best by far is the receiver of the direct amplification transistor, and in the infrared range, quantum photodetectors and bolometers based on doped semiconductors have record characteristics. In the short-wave part of the millimeter range, the losses in the path of SHF significantly contribute to the noise performance of the receiver, and therefore, the development of devices for the addition of the power of the signal and local oscillator. This fact is paid considerable attention. However, at frequencies above 1 THz their noise temperature rises sharply. Mixers based on Schottky barrier diodes operate in terahertz bands, but their sensitivity is often insufficient for practical applications, and the required great power oscillator in the short end of this range is difficult to implement even in the laboratory. Thus, the problem of practical implementation of sensitive and wideband receivers in the terahertz range is inextricably linked to the search for new alternative frequency conversion mechanisms. One of perspective directions in this area is the use of interferometric systems. In this paper, the operation of the Mach – Zehnder interferometer performed on the basis of a rectangular metal dielectric waveguide is studied. It is shown that unlike conventional balanced circuits, the efficiency of which depends upon the identity of the two mixer diodes, in this case, the high degree of local oscillators noise suppression is achieved at using only one mixer diode, whereby the noise factor of a radio receiver has a relatively low value. Such an approach, particularly in the terahertz range, is more promising and independent.

Keywords: terahertz range, terahertz mixers, waveguides, metal dielectric waveguide, Mach-Zehnder interferometer.