

УДК 621.396.43

**СИСТЕМА ПАРАМЕТРОВ ИНТЕГРАЛЬНОГО ПРИЁМНИКА
СУБМИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА**

ИЛЬЧЕНКО М.Е., ДЕНБНОВЕЦКИЙ С.В., НАРЫТНИК Т.Н., ЛУТЧАК А.В., МАЙ А.В.

*Национальный технический университет Украины «КПИ»,
пер. Индустриальный, 2, Киев, 03056, Украина
director@mitris.com*

**СИСТЕМА ПАРАМЕТРІВ ІНТЕГРАЛЬНОГО ПРИЙМАЧА
СУБМІЛІМЕТРОВОГО ДІАПАЗОНУ**

ИЛЬЧЕНКО М.Ю., ДЕНБНОВЕЦКИЙ С.В., НАРЫТНИК Т.М., ЛУТЧАК О.В., МАЙ О.В.

*Національний технічний університет України «КПІ»,
пр-в. Індустріальний, 2, Київ, 03056, Україна
director@mitris.com*

**SYSTEM PARAMETERS OF THE INTEGRAL RECEIVER
OF THE SUBMILLIMETER RANGE**

ILCHENKO M., DENBNOVETSKY S., NARYTNIK T., LUTCHAK O., MAY O.

*National Technical University of Ukraine "KPI",
Industrialny lane, 2, Kiev, 03056, Ukraine
director@mitris.com*

Аннотация: Разработана базовая конструкция интегрального приёмника диапазона 290-310 ГГц на базе преобразователя частоты на металлодиэлектрическом волноводе (10×10 мм), состоящего из квазиоптического открытого резонатора, сверхразмерных прямоугольных металлического и металлодиэлектрического волноводов и микросборки с нелинейными элементами, который позволяет реализовать широкие полосы рабочих частот (20 ГГц и более). Введение в гетеродин квазиоптического открытого резонатора, обладающего селективными свойствами и пространственным сложением мощности, позволяет достигнуть требуемого уровня мощности (5-10 дБм) гетеродина преобразователя частоты.

Ключевые слова: телекоммуникационные системы, терагерцовый диапазон, интегральный приёмник, преобразователь частоты, гетеродин, квазиоптический открытый резонатор, металлодиэлектрический волновод.

Анотація: Розроблено базова конструкція інтегрального приймача діапазону 290–310 ГГц на базі перетворювача частоти на металодіелектричному хвилеводі (10×10 мм²), що складається з квазиоптичного відкритого резонатора, надрозмірних прямокутних металевого і металодіелектричних хвилеводів і мікроскладення з нелінійними елементами, який дозволяє реалізувати широкі смуги робочих частот (20 ГГц і більше). Введення в гетеродин квазиоптичного відкритого резонатора, що володіє селективними властивостями і просторовим складанням потужності, дозволяє досягти необхідного рівня потужності (5–10 дБм) гетеродина перетворювача частоти.

Ключові слова: телекомунікаційні системи, терагерцовий діапазон, інтегральний приймач, перетворювач частоти, гетеродин, квазиоптичний відкритий резонатор, металодіелектричний хвилевід.

Abstract: The basic design of the 290-310 GHz integrated receiver based on a frequency converter on a metal-dielectric waveguide (10×10 mm²) consisting of a quasioptical open resonator, super-dimensional rectangular metal and metal-dielectric waveguides, and a microassembly with nonlinear elements that allows the realization of wide bands of operating frequencies GHz and more). The introduction into the heterodyne of a quasioptical open resonator having selective properties and spatial addition of power allows us to achieve the required power level (5-10 dBm) of the frequency converter heterodyne.

Keywords: telecommunication systems, terahertz range, integral receiver, frequency converter, heterodyne, quasioptical open resonator, metal-dielectric waveguide.

ВВЕДЕНИЕ

Одной из перспективных сфер применения терагерцовых технологий, являются системы связи и телекоммуникаций.

На сегодняшний день скорости локальных вычислительных систем достигли отметки 100 Гб/с и 40 Гб/с (100 G и 40G Ethernet соответственно), а используется в частности в Украине на данный момент 10G Ethernet. Телевидение высокой чёткости требует цифровой канал 1,5 Гб/с и 6 Гб/с. Поэтому стандарты 10G Ethernet и выше отлично подходят для передачи такого рода трафика. Такая тенденция ведёт к необходимости создания цифровых беспроводных систем, способных напрямую соединяться с 10G системами [1-5].

Сегодня отмечается в сообщении, приходится делать выбор между высокой скоростью передачи данных (оптоволокно) и минимальной задержкой (микроволновые соединения). Но с терагерцовыми беспроводными технологиями можно получить минимальное запаздывание, соизмеримое со скоростью света при пропускной способности на уровне оптоволокна. Кроме того, освоение терагерцового диапазона позволит обеспечить высокопроизводительный канал связи со спутниками.

Одной из важнейших проблем освоения диапазона 0,1-3,0 ТГц все ещё остаётся недостаточное наличие элементной базы твердотельных устройств, способных генерировать требуемые уровни мощности (единицы милливатт и более) [6–7].

Перспективным направлением развития систем терагерцового диапазона является разработка и внедрение новых схмотехнических решений при построении приёмопередающего и антенного оборудования, что позволит, прежде всего, снизить стоимость оборудования и обеспечить необходимые электрические и энергетические характеристики [8].

СТРУКТУРНАЯ СХЕМА ИНТЕГРАЛЬНОГО ПРИЕМНИКА

Ключевыми элементами радиорелейной связи являются радиоэлектронные приёмопередающие устройства, способные формировать и передавать модулированные сигналы необходимой скорости (от 1 Гб/с и выше) и принимать и обрабатывать сигналы с приемлемой высокой чувствительностью.

Структурная схема интегрального приёмника (рис. 1) состоит из полосно-пропускающего фильтра (ППФ), первого балансного смесителя, гетеродина и первого усилителя промежуточной частоты (УПЧ), второго и третьего балансных смесителей и гетеродинов.

Полоса пропускания первого УПЧ составляет от 30,0 ГГц до 40,0 ГГц, второго от «минус» 6,9 ГГц до 7,9 ГГц, третьего – от 0,9 ГГц до 1,9 ГГц.

Таким образом, реализована «сквозная» полоса пропускания $\Delta f = 1,0$ ГГц, позволяющая реализовать уже разработанное модемное оборудование.

Гибкость схемы приёмника заключается в том, что например, на стандарт 802.11a скорость передачи данных до 54 Мбит/с, диапазон частот 5 ГГц или UWB, USB 2.0, диапазон частот 10 ГГц и вести обработку сигнала на второй и первой промежуточной частоте (см. табл. 1).

Таблица 1 - Сравнительные характеристики сверхширокополосных и других систем.

Скорость передачи данных, Мбит/с	Стандарт	Тип модуляции
480	UWB, USB 2.0	PPM/другой тип
90	Fast Ethernet	
54	802.11a	60-QAM, 16-QAM, BPSK, OFDM
20	802.11g	60-QAM, 16-QAM, BPSK, OFDM
11	802.11b	ССК
1	Bluetooth	GMSK

Важной характеристикой линии связи является удельная плотность трафика (табл. 2).

Таблица 2 - Пространственная плотность трафика сверхширокополосных и других систем.

Стандарт	Удельная плотность трафика, Мбит/(с м ²)
802.11b	1,0
Bluetooth	20,0
802.11a	83,0
UWB, USB 2.0	1000

Широкое использование терагерцовых технологий в линиях диапазона 0,1–3,0 ТГц позволяет реализовать потоки до 1000 Мбит/(с м²).

МОДЕЛИРОВАНИЕ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ УЗЛОВ ИНТЕГРАЛЬНОГО ПРИЁМНИКА. ЧАСТОТНЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ СИГНАЛА

Балансный смеситель построен по схеме преобразователя с накачкой на половинной частоте гетеродина. В качестве нелинейных элементов применены два включенных встречно-параллельно диода Шоттки AA138-B3, верхняя граница частоты которого составляет 300 ГГц.

Конструкция преобразователя содержит два квазиоптических сверхразмерных волновода, со стороны гетеродина сечением волновода 7,2×3,4 мм, а со стороны сигнала металлодиэлектрический волновод сечением 10×10 мм. Эти волноводы объединены микросборкой состоящей из планарной антенны, балансного смесителя и усилителя промежуточной частоты.

Конструктивно преобразователь частоты выполнен в виде волноводной вставки.

ГЕТЕРОДИН

Субгармоническая схема частотного преобразователя частоты позволяет снизить рабочую частоту гетеродина, что в некоторой степени облегчает разработку гетеродинной цепи. Тем не менее, сохраняются жесткие требования к стабильности гетеродина и уровню фазовых шумов.

Введение в схему гетеродина квазиоптического открытого резонатора обладающего селективными свойствами и пространственным сложением мощностей позволило на существующей элементной базе реализовать гетеродин с необходимыми уровнем мощности (10...13 дБм), фазовых шумов (80 дБн/10кГц) и стабильностью частоты гетеродина $\pm 1 \times 10^{-7}$ [9].

УСИЛИТЕЛЬ ПРОМЕЖУТОЧНОЙ ЧАСТОТЫ

Схема УПЧ состоит из двух каскадов и построена на микросхеме TGA 4508 фирмы TriQuint ($K_y = 21$ дБ; $K_{ш} = 2,8$ дБ). Кроме усилительных микросхем, схема УПЧ содержит вторичные источники питания, формирующие стабилизированное напряжение на микросхеме.

УПЧ конструктивно совмещен с микросхемой смесителя для минимизации потерь слабого сигнала ПЧ.

Полный коэффициент усиления УПЧ составляет 30 дБ.

КОНСТРУКТИВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ

Интегральный приёмник выполнен в модульном исполнении с максимальным применением монолитных микросхем, обеспечивает компактность конструкции, а также удобство его сборки и монтажа.

Для обеспечения качественной работы приемника будут разработаны вторичные ис-

точники питания, формирующие необходимые высокостабильные напряжения для всех узлов приемника.

Сквозная частотная характеристика приемника имеет суммарный коэффициент не менее 40 дБ, при этом неравномерность коэффициента передачи не превышает 3 дБ.

Сравнительные характеристики интегральных приёмников приведены в табл. 3.

Таблица 3 – Характеристики телекоммуникационных систем терагерцового диапазона

Радиосистема	130 ГГц	250 ГГц	290–310 ГГц
Частота, ГГц	130–134	250 и более	300 и более
Полоса частот, ГГц	4 (до10)	до 20	20 и более
Скорость цифрового потока, Гб/с	1,0	1,0 и более	1,0 и более
Коэффициент шума, дБ	8–10	10–12	15
Подавление зеркального канала, дБ	– 55	– 55	– 55
Коэффициент передачи приёмного тракта, дБ, не менее	20	20	20
Мощность гетеродина, дБм, не менее	10	5	3
Фазовый шум гетеродина, дБн/10кГц	– 80	–80	– 80
Динамический диапазон, дБ	20	20	20
Интермодуляционные искажения 3-го порядка, дБн	25	25	25
Нестабильность частоты: – (time)	$\pm 1 \times 10^{-7}$		$\pm 1 \times 10^{-7}$
Модуляция	QPSK 2 QAM 16, 32, 64, 128, 256	QPSK 2 QAM 16, 32, 64, 128, 256	QPSK 2 QAM 16, 32, 64, 128, 256
Технология	InP, GaAs	InP, GaAs	InP, GaAs

ВЫВОДЫ

Разработанная конструкция преобразователя частоты на металлодиэлектрическом волноводе (10×10 мм), состоящая из квазиоптического открытого резонатора, сверхразмерных прямоугольных металлического и металлодиэлектрического волноводов и микросборки с нелинейными элементами, позволяет реализовать широкие полосы рабочих частот (20 ГГц и более).

Введение в гетеродин квазиоптического открытого резонатора обладающего селективными свойствами и пространственным сложением мощности позволяет достигнуть требуемого уровня мощности (5–10дБм) гетеродина преобразователя частоты.

На базе разработанных электронных компонентов и узлов спроектирована базовая конструкция интегрального приемника диапазона 290–310 ГГц с коэффициентом шума на уровне 15 дБ, которая выполнена в модульном исполнении с максимальным применением монолитных микросхем.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ильченко М.Е., Нарытник Т.Н., Радзиховский В.Н., Кузьмин С.Е., Лутчак А.В Проектирование передающего и приёмного радиотрактов радиорелейных систем терагерцового диапазона // Электросвязь. – № 2. – 2016. – С. 42–49.
2. Ильченко М.Ю., Кравчук С.О., Нарытник Т.М. Безпроводові системи зв'язку субтерагерцового та терагерцового діапазонів // Цифрові технології. – 2014. – Вип. 16. – С.40–59.

3. В.М. Исаев, И.Н. Кабанов, В.В. Комаров, В.П. Мещанов. Современные радиоэлектронные системы // Доклады ТУСУРа, № 4 (34), декабрь 2014.
4. Огляд досягнень в терагерцових комунікаційних системах / І. М. Майборода, І. П. Стороженко, В. П. Бабенко, М. В. Кайдаш // ISSN 2409-7470. Збірник наукових праць Національної академії Національної гвардії України. – 2016. – № 1 (27)
5. М.Е. Ильченко, Т.Н. Нарытник, Б.Н. Шелковников, В.И. Христенко. Радиотелекоммуникационные системы терагерцового диапазона. Электроника и связь 3. Тематический выпуск «Электроника и нанотехнологии», 2011.
6. 300 GHz transmission system / C. Jastrow, K. Munter, R. Piesiewicz, T. Kurner, M. Kochand, T. Kline-Ostmann // Electronics Letters. – 2008. – Vol. 44, No. 3. – P. 75 – 77.
7. Peter H. Siegel. Terahertz technology // IEEE Transaction on Microwave Theory and Techniques. – 2002. – vol. 50, No. 3 – P. 910–928.
8. Денбновецький С.В., Лещишин О.В. Електронні системи // Навчальний посібник. – К.: НТУУ "КПІ". – 2011. – 288 с.
9. M.Ye. Ilchenko, T.N. Narytnik, S.V. Denbnovetskii, O.V. May, O.V. Lutchak, & A.I. Fisun, O.I. Belous. modelling of functional units of the terahertz band transmitting and receiving radio paths. telecommunication and radio engineering, 75 (x): 1–13(2016).

REFERENCES

1. Yl'chenko M.E., Narytnyk T.N., Radzykhovskyy V.N., Kuz'myn S.E., Lutchak A.V Proektyrovanye peredayushcheho y pryemnoho radyotraktov radyoreleynykh system terahertsovoho dyapazona // Elektrosvyaz'. – # 2. – 2016. – S. 42–49.
2. Il'chenko M.Yu., Kravchuk S.O., Narytnyk T.M. Bezprovodovi systemy zv'yazku subterahertsovoho ta terahertsovoho diapazoniv // Tsyfrovі tekhnolohiyi. – 2014. – Vyp. 16. – S.40–59.
3. V.M. Ysaev, Y.N. Kabanov, V.V. Komarov, V.P. Meshchanov. Sovremennye radyoElektronnye systemy // Doklady TUSURa, # 4 (34), dekabr' 2014
4. Ohlyad dosyahnen' v terahertsovykh komunikatsiynnykh systemakh / І. М. Майборода, І. П. Стороженко, В. П. Бабенко, М. В. Кайдаш. // ISSN 2409–7470. Zbirnyk naukovykh prats' Natsional'noyi akademiyi Natsional'noyi hvardiyi Ukrayiny. – 2016. – # 1 (27)
5. М.Е. Yl'chenko, T.N. Narytnyk, B.N. Shelkovnykov, V.Y. Khrystenko. Radyotelekommyunikatsyonnye systemy terahertsovoho dyapazona. Elektronika y svyaz' 3. Tematycheskyy vypusk «Elektronika y nanotekhnolohyy», 2011.
6. 300 GHz transmission system / C. Jastrow, K. Munter, R. Piesiewicz, T. Kurner, M. Kochand, T. Kline-Ostmann // Electronics Letters. – 2008. – vol. 44, No. 3. – p.75–77.
7. Peter H. Siegel. Terahertz technology // IEEE Transaction on Microwave Theory and Techniques. – 2002. – vol. 50, No. 3 – P. 910–928.
8. Denbnovets'kyu S.V., Leshchyshyn O.V. Elektronni systemy//Navchal'nyy posibnyk.-K.:NTUU"KPI".-2011.-288 s.
9. M.Ye. Ilchenko, T.N. Narytnik, S.V. Denbnovetskii, O.V. May, O.V. Lutchak, & A.I. Fisun, O.I. Belous. Modelling of functional units of the terahertz band transmitting and receiving radio paths. Telecommucation and Radio engineering, 75 (x): 1–13(2016).