

УДК 621.396.43

# ПРОЕКТИРОВАНИЕ ИНТЕГРАЛЬНОГО ПРИЕМНИКА ТЕРАГЕРЦОВОГО ДИАПАЗОНА ЧАСТОТ



[М.Е. ИЛЬЧЕНКО](#), [С.В. ДЕНЬНОВЕЦКИЙ](#), [Т.Н. НАРЫТНИК](#), [А.В. ЛУТЧАК](#),  
[А.В. МАЙ](#)

Национальный технический университет Украины  
«КПИ имени Игоря Сикорского»

**Abstract** – The justification for selecting the required frequency resource in the terahertz range has been made. It is noted that above frequencies of 100 GHz, there are three local minimum of 110-150GHz, 220-310 GHz and 370-400 GHz. In the work for research and design of an integrated receiver the operating frequency band of 280-300 GHz in the terahertz range was chosen. The modeling of functional units of the integrated receiver is made, which includes the following main functional elements: balanced mixer, local oscillator and intermediate frequency amplifier. In the process of work, the simulation and calculation of the characteristics of the integral receiver was carried out with the help of software complex – Comsol Multiphysics. The basic design of the 280-300 GHz integrated receiver based on the frequency converter on a metal-dielectric waveguide (10×10 mm) consisting of a quasioptical open resonator, super-dimensional rectangular metal and metal-dielectric waveguides, and a microbalance of a balanced mixer (BM) with nonlinear elements, which allows operating frequencies bands (20 GHz or more). Scientific novelty consists in solving the problem of increasing the working range of telecommunications by specific methods and technical solutions which were offered by the authors. The proposed technical solution makes it possible to implement a wide band of operating frequencies of 20 GHz or more in the frequency converter, reduce additive parasitic coherent and incoherent oscillations of the local oscillator to 50 dB or more; needed power was 10-13 dBm of Heterodyne.

**Анотація** – Виконано моделювання функціональних вузлів інтегрального приймача, яке включає в себе наступні основні функціональні елементи: балансний змішувач, гетеродин і підсилювач проміжної частоти. Розроблено базову конструкцію інтегрального приймача діапазону 280-300ГГц на базі перетворювача частоти на метало діелектричному хвилеводі (10×10 мм). Наукова новизна полягає у вирішенні проблеми підвищення робочого діапазону засобів телекомунікацій шляхом запропонованих авторами конкретних методів і технічних рішень.

**Аннотация** – Выполнено моделирование функциональных узлов интегрального приемника, которое включает в себя следующие основные функциональные элементы: балансный смеситель, гетеродин и усилитель промежуточной частоты. Разработана базовая конструкция интегрального приемника диапазона 280-300ГГц на базе преобразователя частоты на металлодиэлектрическом волноводе (10×10мм). Научная новизна состоит в решении проблемы повышения рабочего диапазона средств телекоммуникаций путем предложенных авторами конкретных методов и технических решений.

## Введение

В последнее время по мере увеличения потребности в обеспечении передачи трафика наземной мобильной связи, представленной сетями технологии IMT-2000, IMT-Advanced и в будущем технологии IMT-2020, важным становится использование фиксированной радиосвязи в транспортной сети. На сегодняшний день скорости локальных вычислительных систем достигли отметки 100 Гбит/с и 40 Гбит/с (100 Gb/s и 40 Gb/s Ethernet соответственно), а используется в частности в Украине на данный момент 10 Gb/s Ethernet. Телевидение высокой четкости требует цифровой канал 1,5 Гбит/с и 6 Гбит/с. Поэтому стандарты 10 Gb/s Ethernet и выше отлично подходят для передачи такого рода трафика. Такая тенденция ведет к необходимости создания цифровых беспроводных систем, способных напрямую соединяться с 10 Gb/s системами [1-5].

При этом приходится делать выбор между высокой скоростью передачи данных (оптоволокно) и минимальной задержкой (микроволновые соединения). Именно 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 еще остается недостаточное наличие элементной базы твердотельных устройств, способных генерировать требуемые уровни мощности (единицы милливатт и более) [6-7, 10]. Перспективным направлением развития систем терагерцового диапазона является разработка и внедрение новых схемотехнических решений при построении приемопередающего и антенного оборудования, что позволит, прежде всего, снизить стоимость оборудования и обеспечить необходимые электрические и энергетические характеристики [8].

Сегодня мобилизационная точка исследований определяется использованием сверхширокополосных импульсных сигналов IR-UWB в системах радиосвязи и радиолокации, в том числе и нового способа приема, что условно назван «неэнергетическим». Цель данной работы заключается в решении проблемы повышения рабочего диапазона средств телекоммуникаций, путем предложенных авторами конкретных методов и технических решений проектирования интегрального приемника терагерцового диапазона 280-300 ГГц для последующего исследования IR-UWB и других радиосистем в терагерцовом диапазоне.

## **I. Выбор частоты для системы терагерцового диапазона**

В работе говорится о частотах выше 100 ГГц, поэтому выбор рабочей частоты необходимо проводить в диапазоне 100 ГГц и выше. Естественно, что частоту необходимо выбрать такую, которая бы обеспечивала максимально возможную дальность действия радиосистемы. Согласно проведенного в работе [9] анализа частотного ресурса до частоты 1 ТГц (рис. 1), частоты до 20 ГГц мало затухают в окружающем пространстве, поэтому их можно использовать для радиосистем большого радиуса действия. Что касается частот близких к 100 ГГц и выше, то их можно использовать для радиосистем ближнего радиуса действия. С другой стороны, такие системы физически способны передавать быстрые цифровые потоки, что позволяет использовать их в радиосистемах нового поколения.

При анализе частот выше 100 ГГц из рис. 1 видно, что имеет место три локальных минимума в диапазоне 110-150 ГГц, 220-310 ГГц и 370-400 ГГц. Последние два характеризуются более крупной величиной погонного затухания в свободном пространстве – около 10 дБ/км, поэтому использование этого ресурса возможно только в системах персональной связи (например, системы Bluetooth).

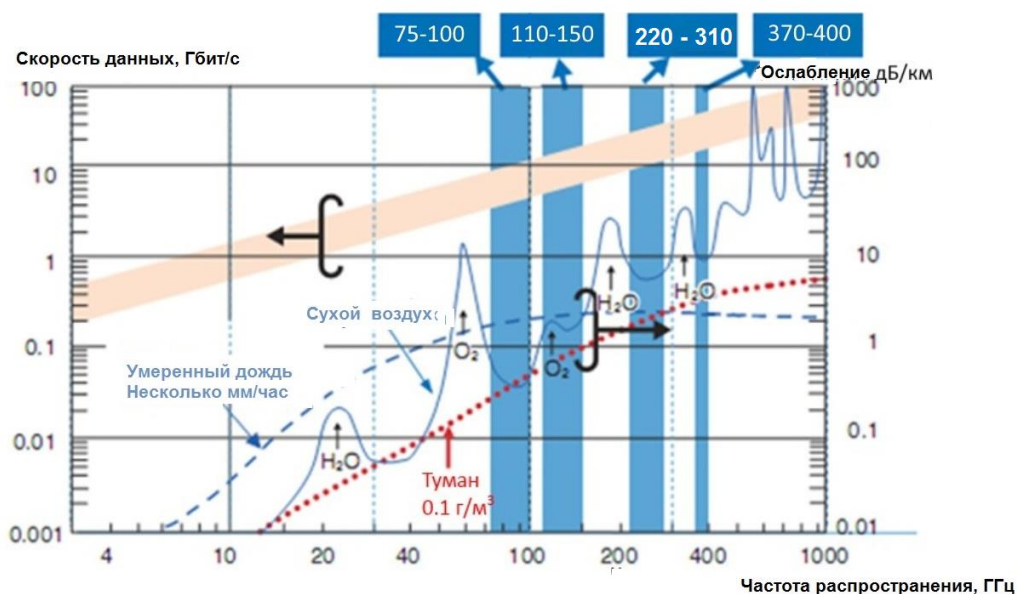


Рис. 1. Зависимость атмосферного затухания (правая шкала) и теоретически возможной пропускной способности канала (левая шкала) от частоты распространения

В системах связи на данном этапе (в условиях ограниченной мощности передатчика) могут быть использованы частоты до 400 ГГц. Однако это не означает, что другие частоты использоваться не будут. Когда мощность передатчика уже не будет проблемой, другие частоты также могут быть задействованы. Итак, выбор частоты фактически ограничивается полосой 370-400 ГГц. В работе для проектирования и исследования интегрального приемника выбрана полоса частот 280-300 ГГц в терагерцовом диапазоне.

## II. Структурная схема интегрального приемника

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

Структурная схема интегрального приемника (рис. 2) состоит из полосно-пропускающего фильтра (ППФ), первого балансного смесителя, гетеродина и первого усилителя промежуточной частоты (УПЧ), второго балансного смесителя и гетеродина.

Полоса пропускания по ПЧ первого смесителя составляет 25,0...45,0 ГГц, второго – 3,1...10,6 ГГц.

Таким образом, достигнута «сквозная» полоса пропускания  $\Delta f=7,5$  ГГц, позволяющая использовать уже разработанное модемное оборудование.

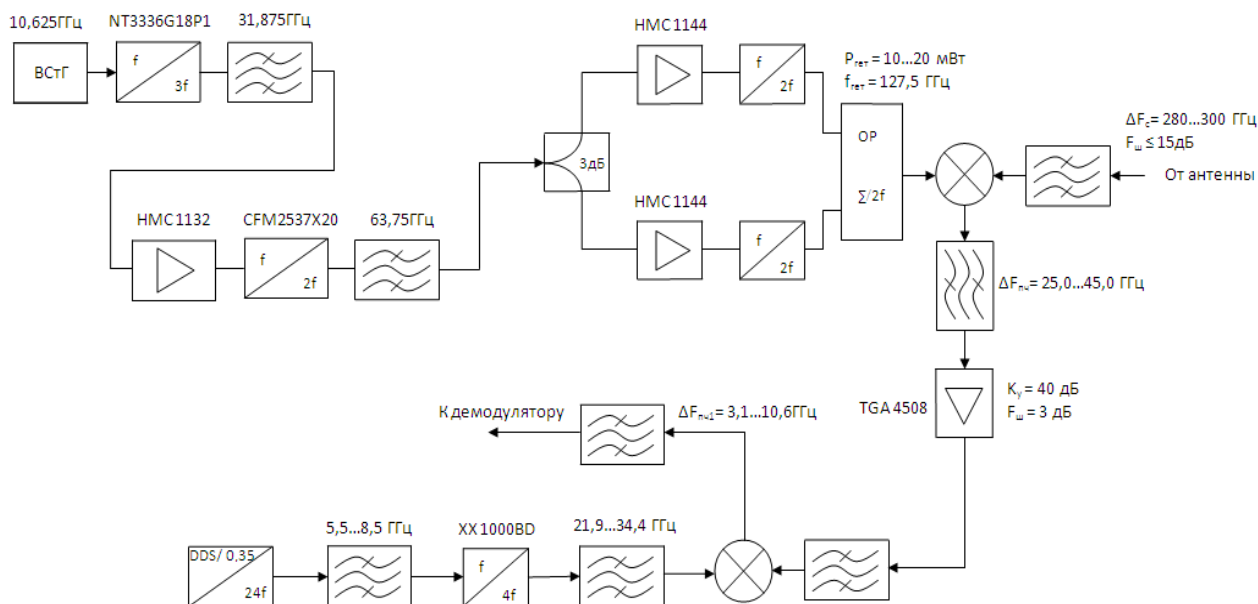


Рис. 2. Структурная схема интегрального приемника терагерцового диапазона

Гибкость схемы приемника заключается в том, что имеется возможность использовать уже готовые технологические решения (например, в технологии стандарта 802.11a скорость передачи данных до 54 Мбит/с, диапазон частот 5 ГГц или UWB, USB 2.0, диапазон частот 10 ГГц) и возможно вести обработку сигнала на второй 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	CCK
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 <sup>2</sup>
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 м<sup>2</sup>.

### III. Моделирование функциональных узлов интегрального приемника

Моделирование включает в себя следующие основные функциональные элементы: балансный смеситель, гетеродин и усилитель промежуточной частоты. В процессе исследования моделирование и расчет характеристик интегрального приемника осуществлялся с помощью программного комплекса – Comsol Multiphysics.

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. Конструкция преобразователя содержит два квазиоптических сверхразмерных волновода: со стороны гетеродина – волновод сечением 7,0×3,5 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.

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 свойством пространственного сложения мощностей, позволяет на существующей элементной базе реализовать гетеродин с необходимым уровнем мощности (10...13 дБм) и снизить до уровня 50 дБ и более аддитивные паразитные когерентные и некогерентные колебания гетеродина, благодаря его селективным свойствам. Гетеродин обладает уровнем фазовых шумов *минус* 80 дБн/10кГц и стабильностью частоты гетеродина  $\pm 1 \times 10^{-7}$  [11].

Схема усилителя промежуточной частоты (УПЧ) состоит из двух каскадов и построена на микросхеме TGA 4508 фирмы TriQuint ( $\Delta f_{ПЧ1} = 25-45$  ГГц;  $K_y = 20$  дБ;  $K_{ш} = 3,0$  дБ). Кроме усилительных микросхем, схема УПЧ содержит вторичные источники питания, формирующие стабилизированное напряжение.

УПЧ конструктивно совмещен с микросхемой смесителя для минимизации потерь слабого сигнала ПЧ. Полный коэффициент усиления УПЧ составляет 40 дБ.

### IV. Конструктивные особенности и характеристики

Интегральный приемник выполнен в модульном исполнении с максимальным применением монолитных микросхем, что обеспечивает компактность конструкции,

а также удобство его сборки и монтажа. Для обеспечения качественной работы приемника предусмотрены вторичные источники питания, формирующие необходимые высокостабильные напряжения для всех узлов приемника. Сквозная частотная характеристика приемника имеет суммарный коэффициент усиления не менее 40 дБ, при этом неравномерность коэффициента передачи не превышает 3 дБ.

Сравнительные характеристики интегральных приемников приведены в табл. 3.

Таблица 3. Характеристики интегральных приемников терагерцового диапазона

Радиосистема	130 ГГц	250 ГГц	280-300 ГГц
Частота, ГГц	130...134	250	300
Полоса частот, ГГц	4 (до10)	до 20	20 и более
Скорость цифрового потока, Гбит/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 приемного тракта, дБ, не менее	20	20	40
Мощность гетеродина, дБм, не менее	10	5	10
Фазовый шум гетеродина, дБн/10кГц	– 80	–80	– 80
Нестабильность частоты: - (time)	+/- 1×10 <sup>-7</sup>		+/- 1×10 <sup>-7</sup>
Модуляция	QAM 16, 32, 64	QAM 16, 32, 64	QAM 16, 32, 64
Технология	InP, GaAs	InP, GaAs	InP, GaAs

## Выводы

Разработана конструкция преобразователя частоты на металлодиэлектрическом волноводе (10×10 мм), состоящая из квазиоптического открытого резонатора, сверхразмерных прямоугольных металлического и металлодиэлектрического волноводов и микросборки балансного смесителя с нелинейными элементами, позволяющая 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 (10-13 дБм) гетеродина преобразователя частоты.

На базе разработанных электронных компонентов и узлов спроектирована базовая конструкция интегрального приемника диапазона частот 280-300 ГГц с коэффициентом шума на уровне 15дБ, которая выполнена в модульном исполнении с максимальным применением монолитных микросхем.

Решена научная задача, которая заключается в решении проблемы повышения рабочего диапазона средств телекоммуникаций путем предложенных авторами конкретных методов и технических решений.

## Список литературы:

1. Ильченко М.Е., Нарытник Т.Н., Радзиховский В.Н., Кузьмин С.Е., Лутчак А.В. Проектирование передающего и приемного 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. Исаев В.М., Кабанов И.Н., Комаров В.В., Мецанов В.П. Современные радиоэлектронные системы // Доклады ТУСУРа. –2014. – № 4 (34). – С. 5-21.
4. Майборода І.М., Стороженко І.П., Бабенко В.П., Кайдаш М.В. Огляд досягнень в терагерцових комунікаційних системах // Збірник наукових праць Національної академії Національної гвардії України, 2016. Вип. № 1 (27). – С. 45-48.
5. Ильченко М.Е., Нарытник Т.Н., Шелковников Б.Н., Христенко В.И. Радиотелекоммуникационные системы терагерцового диапазона // Электроника и связь. – 2011. – №3. – С. 205-209.
6. Jastrow C., Munter K., Piesiewicz R., Kurner T., Kochand M., Kline-Ostmann T. 300 GHz transmission system // 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., Лецишин О.В. Електронні системи // Навчальний посібник. – К.: НТУУ "КПІ", 2011. – 288 с.
9. Kukutsu N., Kado Y. Overview of millimeter and terahertz wave application Research // NTT Technical Review / Special Feature: Applied Technology for Millimeter and Terahertz Electromagnetic Waves. – 2009. – Vol. 7, No.3. – P. 1-6.
10. Takano K., Katayama K., Amakawa S., Yoshida T., Fujishima M. Wireless digital data transmission from a 300 GHz CMOS transmitter // Electronics Letters. – 2016. – Vol. 52, No. 15. – P. 1353–1355.
11. Ilchenko M.Ye., Narytnik T.N., Denbnovetskii S.V., May O.V., Lutchak O.V., Fisun A.I., Belous O.I. Simulation of functional units of the terahertz band transmitting and receiving radio systems // Telecommunication and Radioengineering. – 2016. – Vol. 75, №15. – P. 1027-1039.