УДК 621.39

МОДЕЛИРОВАНИЕ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ УЗЛОВ РАДИОРЕЛЕЙНОЙ СИСТЕМЫ ТЕРАГЕРЦОВОГО ДИАПАЗОНА

М.Е. Ильченко, С.Е. Кузьмин, Т.Н. Нарытник, В.Н. Радзиховский

Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт»

Abstract *– A number of the devices, which can be used for creation of new communication systems generation in terahertz band, have been developed. Computer and physical modeling of the functional units for terahertz communications system permit to designe the analog part of the transceiver. The transceiver contains:*

- transmitting circuit including input intermediate frequency amplifier (IFA), up-convertor and output bandpass filter (BPF);

- receiving circuit including input BPF, mixer and output IFA.

High frequency (RF) transmitter and receiver circuits operate in the frequency band 127-133 GHz. Intermediate frequency (IF) circuits operate in band 1-2 GHz. The particular of the transceiver is the use of a common local oscillator (LO) for receiving and transmitting circuits. In this connection receiver and transmitter operate at different frequency sidebands of the convertors. Bandpass filters provide isolation of receiving and transmitting circuits from each other and from LO circuit. These devices for the first time permit to create the transceiver for digital radio relay system in 130 GHz frequency band. Output power of transmitter was -10 dBm and sensitivity of receiver was not worse 10^{-11} W. The transmission speed 155 Mbit/s was achieved using QAM-256 modulation in pass band 25 MHz. One of the most promising applications of terahertz relay systems is wireless transfer in real-time uncompressed (HD-SDI) high-definition television signals (HDTV) and ultra high-definition (Super HDTV), the transmission rate which reach 1,5 Gbit/s and 6,0 Gbit/s, respectively. This wireless system can be quickly used to organize temporal radio access, in particular, it can be a key component for immediate reconstruction of communications in emergency situations where the fiber-optic network cannot function as a result of a failure. The achieved results can be used as a base for creation new scientific and technological trend - terahertz high-speed telecommunications. The next stage and promising area of development is the creation of the integrated multifunction devices, where in a single assembly are oscillating, converting, filtering, amplification, control, and other elements, including the antenna. Thus, it will be possible to create new generation of the transmitting and receiving device in terahertz frequency band.

Анотація *– Наведено результати моделювання функціональних вузлів (частотні перетворювачі, фільтри, підсилювально-помножувальні ланцюги), які дозволили вперше створити лабораторний зразок прийомопередавача для радіорелейної системи в діапазоні частот 130 - 134 ГГц. Потужність на виході передавача склала мінус 10 дБм, чутливість приймача була не гірше 10^{-11} Вт. При модуляції КАМ-256 була досягнута швидкість передачі даних 155 Мбіт/с в смузі частот 25 МГц.*

Аннотация *– Приведены результаты моделирования функциональных узлов (частотные преобразователи, фильтры, усилительно-умножительные цепи), которые позволили впервые создать лабораторный образец приемо-передатчика для радиорелейной системы в диапазоне частот 130 – 134 ГГц. Мощность на выходе передатчика составила минус 10 дБм, чувствительность приемника была не хуже 10^{-11} Вт. При модуляции КАМ-256 была достигнута скорость передачи данных 155 Мбит/с в полосе частот 25 МГц.*

Введение

Одним из наиболее перспективных путей для реализации гигабитной линии радиосвязи является использование терагерцовой частоты в качестве несущей, поскольку пропускная способность линии радиосвязи увеличивается с ростом доступной полосы частоты сигнала. Особенностью терагерцовых волн является относительно

сильное затухание в атмосфере, вызванное дождем и резонансным поглощением в молекулах кислорода и воды, поэтому они пригодны для радиосвязи на малых расстояниях. Дальность связи в терагерцовом диапазоне оценивается несколькими километрами из-за ограничений в выходной мощности передатчика и чувствительности приемника. Вместе с тем, возможность передачи большого объема данных в единицу времени может позволить, в частности, мультиплексную передачу несжатых телевизионных сигналов с высоким разрешением. Данные обстоятельства указывают на перспективность терагерцового диапазона для построения локальных телекоммуникационных систем с высокой пропускной способностью [1-3]. В частности, японскими специалистами создана радиорелейная линия, работающая в диапазоне частот 120 ГГц [4] и обеспечивающая передачу информации со скоростью 10 Гбит/с на расстояние свыше 800 м.

I. Постановка задачи

Основная цель настоящей работы – демонстрация реальной возможности качественного увеличения пропускной способности системы путем создания приемо-передатчика для радиорелейной системы, работающей в терагерцовом диапазоне частот. На основе компьютерного и физического моделирования функциональных узлов телекоммуникационной системы была спроектирована аналоговая часть приемо-передатчика, структурная схема которой приведена на рис.1.

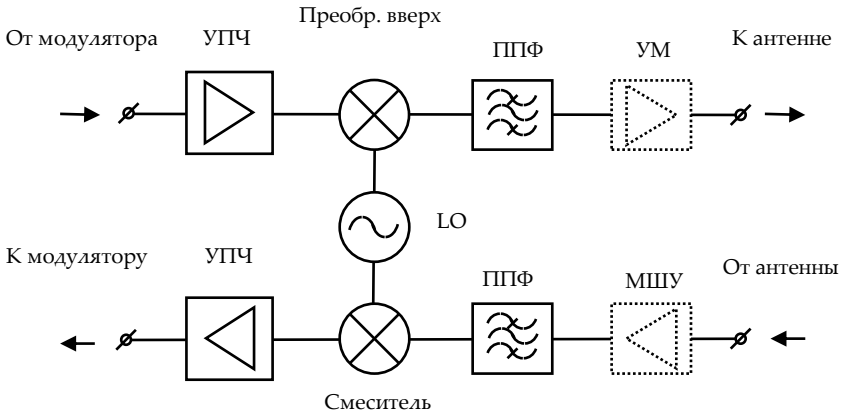

Рис. 1. Структурная схема приемо-передатчика

Схема содержит:

- передающий тракт в составе входного усилителя промежуточной частоты (УПЧ), частотного преобразователя вверх и выходного полосно-пропускающего фильтра (ППФ);

- приемный тракт в составе входного ППФ, смесителя и выходного УПЧ.

Высокочастотные (ВЧ) цепи передающего и приемного трактов работают в частотном диапазоне 128-134 ГГц. Цепи промежуточной частоты (ПЧ) работают в диапазоне 1-2 ГГц. Особенностью схемы является использование общего гетеродина для приемного и передающего трактов. При этом тракты приема и передачи работают

на разных боковых полосах частотных преобразователей. Высокочастотные ППФ обеспечивают развязку трактов друг от друга и от второй гармоники гетеродина.

II. Частотные преобразователи

Частотные преобразователи, а именно, смеситель приемника и преобразователь вверх передатчика имеют идентичные схемы и конструкции, но различаются направлением прохождения сигналов в соответствии с их функциональным назначением. Была выбрана субгармоническая схема преобразователей, которая позволяет использовать гетеродин с частотой вдвое ниже, чем в обычных преобразователях. Данное обстоятельство существенно облегчает задачу построения гетеродинной цепи, что особенно важно при столь высоких рабочих частотах.

При выбранной частоте гетеродина $f_{гет}$ = 64,8 ГГц частоты каналов радиосвязи будут находиться в диапазонах f = 2 $f_{гет}$ ± $F_{ПЧ}$, что составляет 130,6-131,6 ГГц и 127,6-128,6 ГГц.

Конструкция преобразователя схематически показана на рис. 2.

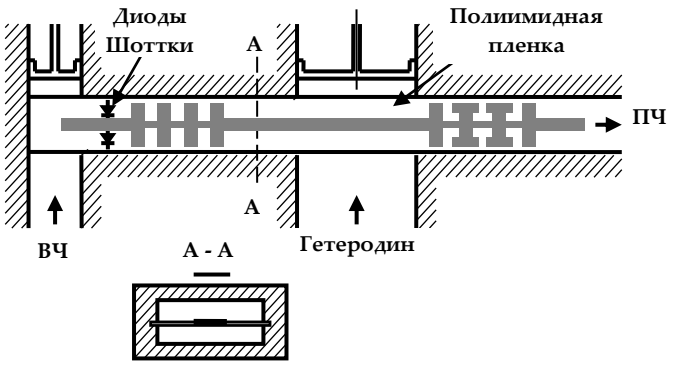

Рис. 2. Конструкция преобразователя

Конструкция содержит два волноводных тракта, связанных симметричной полосковой линией, на которой смонтирована пара безкорпусных смесительных диодов, включенных встречно-параллельно в полосковую линию.

В качестве смесительных диодов использованы арсенид-галлиевые диоды с барьером Шоттки. Диоды имеют емкость барьера при нулевом смещении C_{j0}=(8…12) фФ и последовательное сопротивление потерь $R_п$=(6…8) Ом. Безкорпусная конструкция с балочными выводами удобна для монтажа диодов в интегральную схему преобразователей. Диодные пары подбирались таким образом, чтобы обеспечить симметричность результирующей вольтамперной характеристики для качественного подавления нечетных гармоник частоты гетеродина.

Волноводный тракт с сечением канала 1,6 х 0,8 мм составляет часть цепи высокочастотного сигнала и является запредельным для частот гетеродина и ПЧ. Сигнал гетеродина поступает на диоды через волноводный канал сечением 3,6 х 1,8 мм. Канал запределен для сигнала ПЧ, а развязку гетеродина от ВЧ сигнала обеспечивает фильтр нижних частот (ФНЧ) с частотой среза 67 ГГц, выполненный на участке полосковой линии между волноводными каналами.

Цепь сигнала ПЧ полностью реализована на симметричной полосковой линии с подвешенной подложкой. В качестве подложки использована полиимидная пленка толщиной 30 мкм, закрепленная в прямоугольном канале сечением 0,8 х 0,4 мм, запредельном для возникновения высших волноводных мод. Выходной ФНЧ в цепи ПЧ с частотой среза 30 ГГц препятствует проникновению сигналов гетеродина и ВЧ в тракт промежуточной частоты.

Короткозамыкающие поршни в волноводных каналах позволяют осуществлять подстройку соответствующих цепей преобразователей. Внешний вид частотного преобразователя представлен на рис. 3.

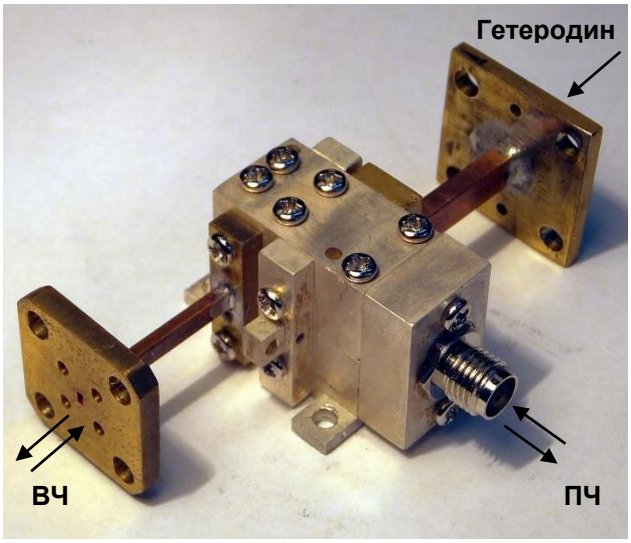

Рис. 3. Частотный преобразователь с присоединенными отрезками волноводов

Измеренные потери преобразования составляли 12 дБ как смесителя, так и преобразователя вверх. Требуемая мощность гетеродина на превышала 1 мВт для смесителя. Для преобразователя вверх мощность гетеродина была увеличена до 20 мВт, чтобы обеспечить линейный режим его работы.

III. Гетеродин

Проблема реализации гетеродина обусловлена как трудностью достижения достаточного уровня мощности на столь высоких частотах, так и необходимостью обеспечения высокой стабильности гетеродина и низкого уровня его фазовых шумов.

Для цифровой радиорелейной системы, работающей в диапазоне 130...134 ГГц, была спроектирована цепь гетеродина на частоту 64,8 ГГц. Из различных схем построения цепи гетеродина была выбрана схема, использующая высокостабильный задающий кварцевый генератор с последующей цепочкой умножительных и усилительных каскадов [4]. Такое построение гетеродинной цепи характеризуется минимальным количеством паразитных гармоник и комбинационных частот и намного дешевле схемы с частотным синтезатором.

Структурная схема цепи гетеродина показана на рис. 4.

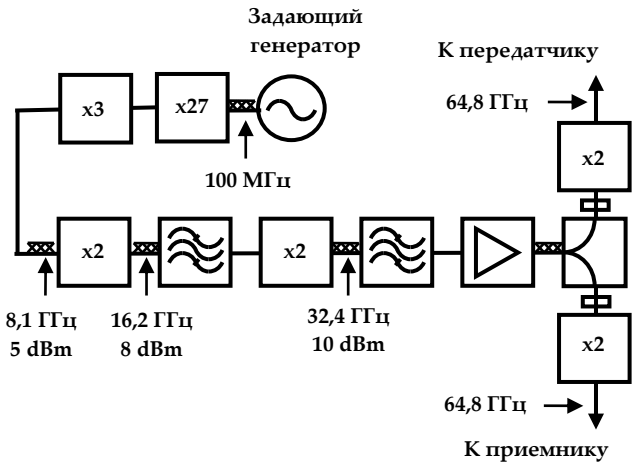

Рис. 4. Структурная схема цепи гетеродина

В качестве задающего использован кварцевый генератор на 100 МГц фирмы Crystek Crystals с уровнем фазовых шумов не выше минус 143 дБ при отстройке от центральной частоты на 1 КГц. Параметры задающего генератора в основном и определяют стабильность частоты и фазовые шумы гетеродина.

Умножение частоты задающего генератора до 8,1 ГГц осуществляется двумя модулями, содержащими умножительно-усилительные каскады, выполненные на транзисторах или монолитных микросхемах, и селектирующие фильтры на поверхностных акустических волнах (ПАВ) или гребенчатого типа. На рис. 5 представлен измеренный спектр сигнала вблизи частоты 8,1 ГГц.

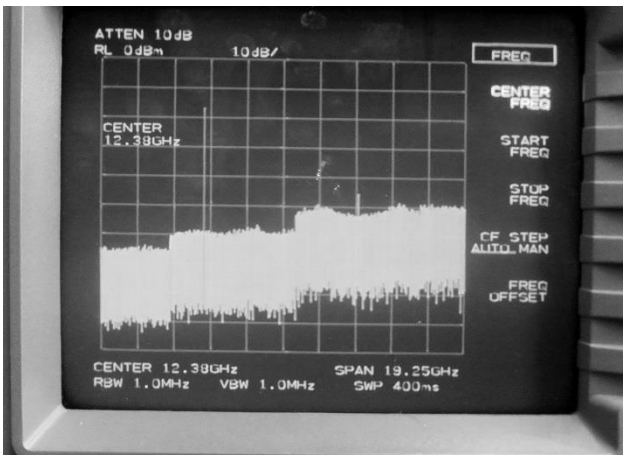

Рис. 5. Спектр сигнала гетеродинной цепи в области частоты 8,1 ГГц

Как показали измерения, вблизи выходного сигнала с частотой 8,1 ГГц отсутствуют заметные паразитные гармоники задающего генератора, а вторая гармоника выходного сигнала подавлена более, чем на 40 дБ. Выходная мощность составляет 7 мВт, а уровень фазовых шумов не превышает 107 дБ при отстройке от центральной частоты 100 КГц и 94 дБ при отстройке 10 КГц.

Выходная часть гетеродинной цепи кроме усилительно-умножительных функций осуществляет разветвление сигнала гетеродина на два канала [5]. Такое по-

строение выходной части позволяет применить общий гетеродин для передающего и приемного трактов, что существенно упрощает схему и конструкцию всего приемо-передатчика. Прием и передача сигналов при этом осуществляется на разных боковых частотах преобразователей.

Схема выходной части гетеродинной цепи содержит два каскадно включенных удвоителя, полосно-пропускающие фильтры, селектирующие необходимые частоты, усилительный каскад и разветвитель, выходные сигналы с которого удваиваются по частоте выходными умножителями. Усилительные и умножительные каскады и разветвитель реализованы на монолитных микросхемах, а полосно-пропускающие фильтры выполнены на поликоровых положках. Все перечисленные узлы смонтированы в едином корпусе в виде отдельного модуля, внешний вид которого показан на рис. 6.

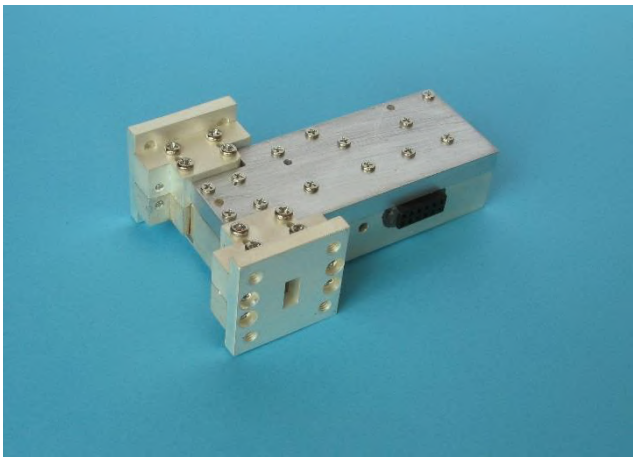

Рис. 6. Умножительно-разветвительный модуль

Выходные умножительные каскады гетеродинной цепи выполнены в отдельных корпусах и построены на умножительных микросхемах, повышающих частоту выходных сигналов гетеродина до 64,8 ГГц.

Монтаж микросхемы в корпусе удвоителя показан на рис. 7.

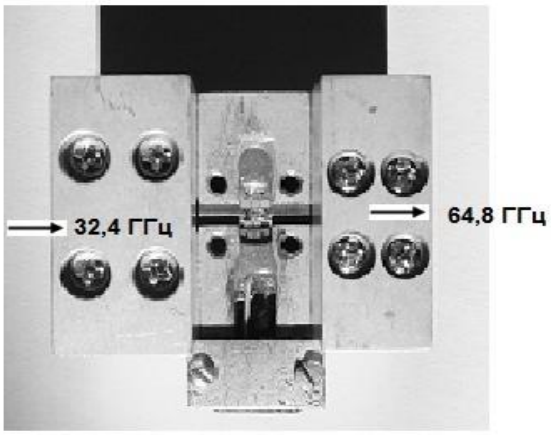

Рис. 7. Выходной удвоитель гетеродинной цепи

Измеренные уровни выходных мощностей гетеродина для трактов приема и передачи составляли 15…20 мВт.

IV. Полосно-пропускающие фильтры

Низкая величина промежуточной частоты ($F_{ПЧ}$ = 1...2 ГГц) обусловливает жесткие требования к высокочастотным ППФ по избирательности. Фильтры должны обеспечить достаточную развязку сигналов передающего и приемного трактов, а также надежную режекцию второй гармоники частоты гетеродина в обоих трактах.

Наиболее приемлемыми в двухмиллиметровом диапазоне длин волн с точки зрения малых потерь и высокой избирательности являются septum-фильтры, которые и были рассчитаны и смоделированы в настоящей работе. Конструктивно фильтр представляет собой тонкую металлическую пластину, вставленную в Е-плоскость волноводного канала. Пластина содержит резонансные окна, связь между которыми определяется шириной разделяющих их полосок. На рис. 8. приведены рассчитанные S-параметры ППФ, а на рис. 9 – фотография фильтра в разобранном виде.

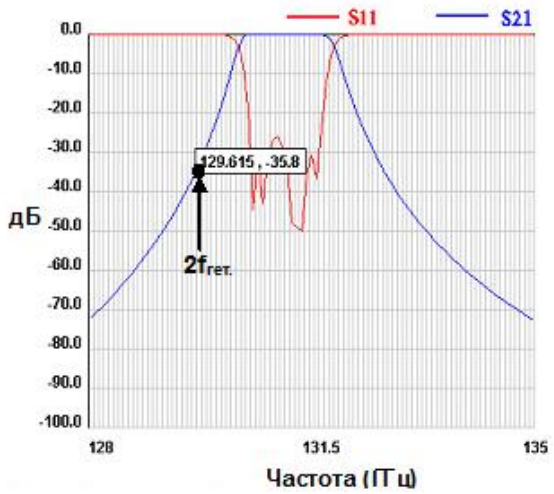

Рис. 8. Расчетные S-параметры фильтра

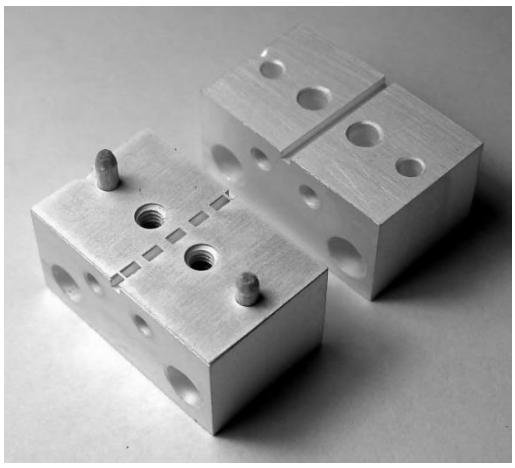

Рис. 9. Фотография septum-фильтра (в разобранном виде)

Измеренная АЧХ фильтра показана на рис. 10.

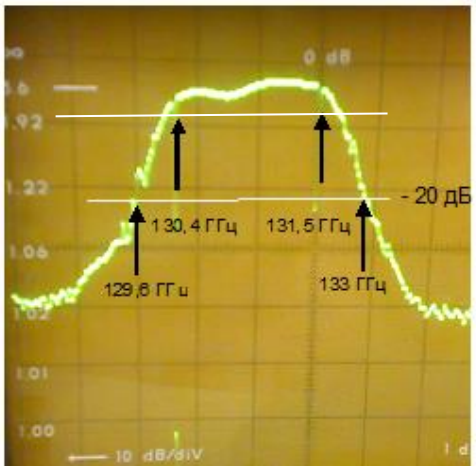

Рис. 10. Измеренная АЧХ фильтра

Как видно из проведенных измерений, фильтр обеспечивает избирательность, достаточную для развязки передающего и приемного трактов. Вторая гармоника гетеродина (129,6 ГГц) подавляется фильтром на 20 дБ. Потери фильтра по плоской части не превышают 3,7 дБ, что является удовлетворительным результатом для столь высоких частот. Неравномерность АЧХ по плоской части не более 2 дБ.

V. Усилитель промежуточной частоты

Усилитель промежуточной частоты разработан на основе усилительных микросхем TQP3M9008 фирмы Triqwint и HMC313 фирмы Hittite. Кроме усилительных микросхем УПЧ содержит монолитные керамические фильтры верхних и нижних частот для формирования необходимой полосы пропускания тракта промежуточной частоты 1 - 2 ГГц, резистивные 3 дБ аттенюаторы для улучшения согласования выходного фильтра с передающей линией, а также стабилизатор LM1117adj, который формирует напряжение питания для микросхем.

УПЧ обеспечивал усиление сигнала в диапазоне 1-2 ГГц на 28,5 дБ с шумовой температурой не более 100 К.

VI. Приемо-передающий тракт

Разработка отдельных функциональных узлов приемо-передающего тракта радиорелейной системы терагерцового диапазона позволила выполнить проектирование и изготовление всей аналоговой части приемо-передатчика. Конструктивно приемо-передатчик выполнен в виде единого блока, включающего все разработанные узлы, модульное исполнение которых обеспечивает компактность всего изделия, удобство его сборки и монтажа. Внешний вид приемо-передатчика показан на рис. 11.

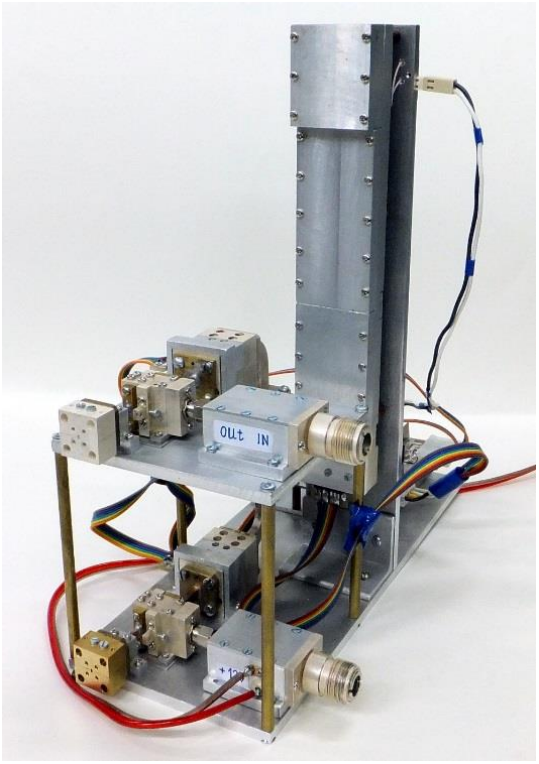

Рис. 11. Приемо-передатчик для радиорелейной системы терагерцового диапазона

Передающий и приемный тракты конструктивно расположены на разных уровнях и питаются от общего гетеродина. По цепям ПЧ тракты имеют коаксиальные вход и выход, а по высокочастотным цепям – волноводные выход и вход в канале 1,6 х 0,8 мм. Приемо-передатчик также включает в себя отдельный блок, формирующий необходимое высокостабильное напряжение для питания всех функциональных узлов трактов.

VII. Результаты эксперимента

Была измерена проходная частотная характеристика приемо-передающего тракта путем подачи на вход передатчика калиброванного сигнала от свип-генератора в диапазоне ПЧ и наблюдении сигнала с выхода приемника на экране индикатора панорамной измерительной установки. При этом высокочастотный выход передатчика соединялся со входом приемника отрезком волновода. Измеренная частотная характеристика показана на рис. 12. Данные измерения позволили определить выходную мощность передатчика, которая составила минус 10 дБм. Таким образом, отношение сигнал/шум на входе приемного тракта превышает 35 дБ, что дает оценку дальности связи не менее 1 км в условиях свободного пространства при использовании антенн с коэффициентом усиления на уровне 45-48 дБ.

Существенное улучшение энергетических характеристик приемо-передатчика может быть достигнуто применением высокочастотных усилителей, показанных пунктиром на структурной схеме (рис. 1).

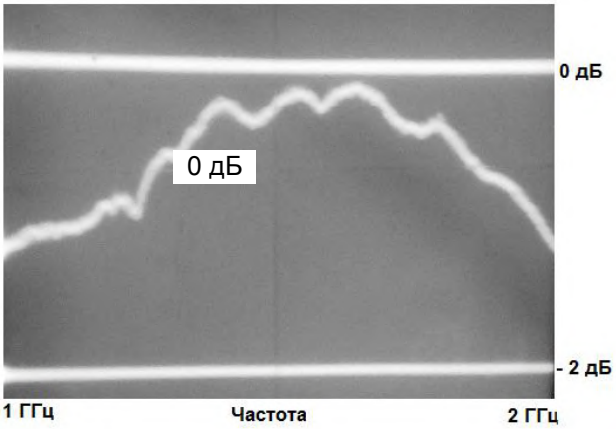

Рис. 12. Проходная частотная характеристика приемо-передающего тракта

Используя цифровой модем, формирующий калибровочный сигнал, была измерена спектральная характеристика сигнала на выходе приемного тракта (рис. 13).

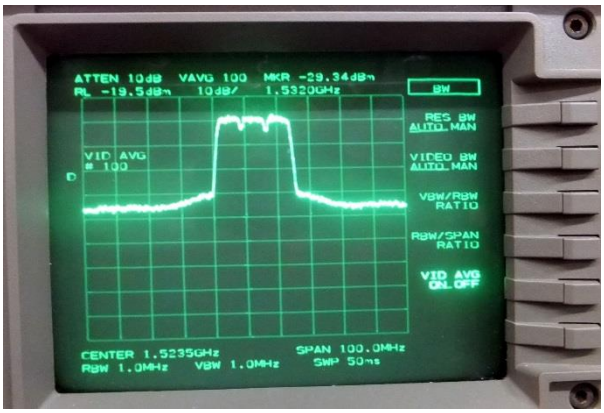

Рис. 13. Спектральная характеристика сигнала на выходе приемника

С помощью созданного приемо-передатчика была обеспечена передача данных между двумя компьютерами со скоростью 155 Мбит/с при использовании модуляции QAM-256 в формируемой модемом полосе частот 25 МГц.

Выводы

Впервые создан лабораторный образец приемо-передатчика для цифровой радиорелейной системы, способной обеспечить передачу и прием в диапазоне 130-134 ГГц цифровой информации со скоростью до 1,5 Гбит/с при дальности радиосвязи в пределах 1 км.

Одним из наиболее перспективных применений радиорелейных систем терагерцового диапазона является беспроводная передача в реальном масштабе времени несжатых (HD-SDI) телевизионных сигналов высокой четкости (High-Definition Telrvision, HDTV) и сверхвысокой четкости (Super HDTV, SHDTV), скорости переда-

чи которых достигают 1,5 Гбит/с и 6,0 Гбит/с соответственно. Такая беспроводная система связи может быть оперативно использована для организации временного радиодоступа, в частности, она может являться ключевым компонентом аварийного восстановления связи в случае чрезвычайных ситуаций, когда волоконно-оптические сети не могут функционировать в результате выхода из строя.

Достигнутые результаты можно рассматривать как основу создания нового научно-технического направления – терагерцовых сверхскоростных телекоммуникаций. Следующим этапом и перспективным направлением развития является создание в интегральном исполнении многофункциональных устройств, где в едином блоке находятся генераторные, преобразовательные, фильтрующие, усилительные, управляющие и другие элементы, включая антенны. Таким образом, можно будет создавать приемные и передающие устройства терагерцового диапазона нового поколения.

Список литературы:

1. *Ilchenko M.Ye., Narytnik T.N., Kuzmin S.E., Belous O.I., Radzikhovsky V.N.* Transceiver 130-134 GHz band and digital radio relay system // Telecommunication and Engineering. – 2013. – Vol. 72, No. 17. – P. 1623-1635.

2. *Narytnik T., Amro A., Ilchenko M., Kalinin V., Turabi O.* Sub-Terahertz Low Power UWB Communicatio Link for WPAN //Network and Complex Systems. – 2012. – Vol. 2, No.4. – P. 45-50.

3. *Akihiko Hirata, Ryoichi Yamaguchi, Toshihiko Kosugi, Hiroyuki Takahashi, Koichi Murata, Tadao Nagatsuma, Naoya Kukutsu, Yuichi Kado, Naohiko Iai, Satoshi Okabe, Satoshi Kimura, Hidehiko Ikegawa, Hiroshi Nishikawa, Toshihiro Nakayama, Tomonori Inada.* 10-Gbit/s Wireless Link Using InP HEMT MMICs for Generating 120-GHz-Band Millimeter-Wave Signal // IEEE Trans on Microwave Theory and Techniques. - 2009. – Vol. 57, No. 5. – P. 1102-1109.

4. *Kuzmin S.E., Narytnik T.N., Radzikhovsky V.N.* Local oscillator circuit for radio relay system in 130 – 134 GHz band // 21st Int. Crimean Conf. "Microwave & Telecommunication Technology" (CriMiCo'2011), Sevastopol, 2011. – P. 396-397.