

А.Г. Воронцов, Л.В. Левченко

Донецкий национальный технический университет, г. Донецк
кафедра автоматики и телекоммуникаций

E-mail: _vag_@mail.ru, levchenkoliliya@yandex.ru

ОБОСНОВАНИЕ МЕТОДИКИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ УЗЛОВ ПРИЕМОПЕРЕДАЮЩЕЙ АППАРАТУРЫ РАДИОТРАКТА МИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА

Аннотация

Воронцов А.Г., Левченко Л.В. Обоснование методики проектирования узлов приемопередающей аппаратуры радиотракта миллиметрового диапазона. В работе обоснована методика проектирования СВЧ-узлов аппаратуры связи на примере диодного смесителя приемопередающего радиотракта миллиметрового диапазона длин волн. В основу методики положены масштабное макетирование и цифровое моделирование.

Ключевые слова: цифровое моделирование, масштабное макетирование, субгармониковый смеситель, потери преобразования, развязка цепей сигналов.

Общая постановка проблемы.

Беспроводные каналы связи современных телекоммуникационных систем работают преимущественно в СВЧ диапазоне, в основном в области дециметровых и сантиметровых длин волн. В последнее время частотный ресурс этих поддиапазонов исчерпывается, что сдерживает развитие телекоммуникационных систем, как по наращиванию абонентской емкости, так и по возможным телекоммуникационным услугам. В связи с этим наблюдаются тенденции к сдвигу несущих частот приемопередатчиков радиоканалов телекоммуникационных систем в миллиметровую область длин волн, что определяет важность задач разработки и совершенствования аппаратуры каналов связи К-диапазона, как в настоящее время, так и на ближайшую перспективу.

Одной из наиболее трудоемких задач проектирования СВЧ канала связи является задача разработки трансиверного тракта. При разработке его узлов возникает необходимость проведения исследований, в частности, макетирования, однако вследствие труднодоступности измерительной аппаратуры для К-диапазона, процесс проектирования замедляется и усложняется.

Постановка задач исследования.

Целью работы является упрощение процедур проектирования узлов СВЧ канала связи К-диапазона на этапе отработки макетов за счет совместного использования методов масштабного макетирования и цифрового моделирования распределенных элементов и электродинамических структур.

Для данного частотного диапазона целесообразно использовать смеситель, работающий на гармониках сигнала гетеродина, поскольку из-за высоких рабочих частот возникает проблема обеспечения необходимого уровня мощности его сигнала [1]. Субгармониковый смеситель позволит уменьшить частоту основной гармоники сигнала гетеродина, тем самым упростить конструкцию последнего и решить задачу обеспечения нужного уровня мощности его сигнала благодаря особенностям процесса смешивания [2].

Субгармониковый смеситель работает на гармониках сигнала гетеродина. К примеру, на нелинейном элементе смесителя, работающего на второй гармонике сигнала гетеродина, появляются комбинационные составляющие $f_{\text{вх}} \pm 2f_{\text{гет}}$. Составляющая с частотой $f_{\text{ПЧ}} = f_{\text{вх}} - 2f_{\text{гет}}$ –

продукт смешивания первой гармоники входного сигнала и второй гармоники сигнала гетеродина – является полезным сигналом промежуточной частоты (рисунок 1).

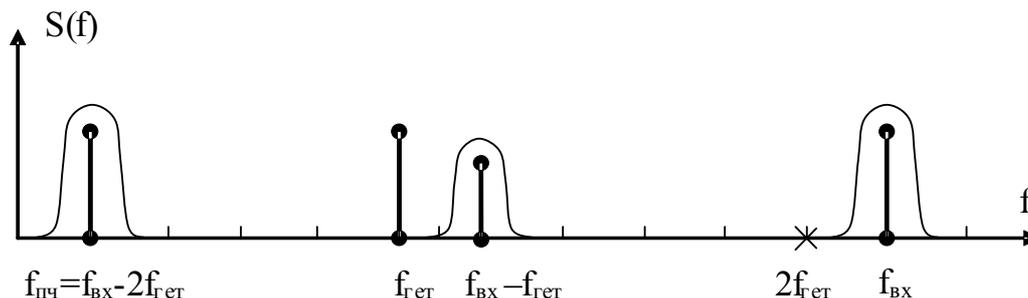


Рисунок 1 – Спектральный состав сигнала смесителя, работающего на второй гармонике сигнала гетеродина

За счет использования в процессе смешивания второй гармоники сигнала гетеродина (в рассмотренном примере), частота основной гармоники будет меньше в два раза, что позволит упростить задачу обеспечения необходимой мощности сигнала гетеродина. Кроме того, за счет уменьшения частоты сигнала гетеродина упрощается выполнение цепей развязки смесителя.

На данный момент существует несколько разработок смесителей, работающих на второй гармонике сигнала гетеродина, для К-диапазона. В работе [3] описывается разработка субгармонического смесителя для диапазона частот 200-240 ГГц. В этом диапазоне потери преобразования не превышают 10 дБ, а на центральной частоте 215 ГГц потери не выше 5 дБ, что является хорошими характеристиками. Основным недостатком этой разработки заключается в том, что смеситель выполнен по волноводной технологии, что ухудшает технологичность и значительно повышает его стоимость. Аналогичный смеситель, работающий на частоте 183 ГГц и обеспечивающий потери преобразования около 5 дБ, представлен в работе [4].

Более удачным примером конструкции является смеситель, представленный в работе [5], который выполнен по микрополосковой технологии, что улучшает показатели технологичности и стоимости. Потери преобразования такого смесителя составляют около 20 дБ, что не является достаточным для большинства применений. Таким образом, при разработке смесительного узла каналообразующей СВЧ аппаратуры следует уделять внимание не только оптимизации его характеристик, как это сделано в работах [4] и [5], но и требованиям дешевизны и технологичности.

Решение задач и результаты исследований.

Широко известным методом проектирования устройств связи является метод моделирования. Суть этого метода состоит в разработке и реализации модели проектируемого объекта. Современным методом является метод цифрового моделирования.

Цифровое моделирование узлов приемопередающего тракта подразумевает использование специального программного обеспечения, позволяющего строить картину электромагнитного поля элементов узлов тракта.

Существует еще один широко известный метод проектирования – метод масштабного макетирования. На первом этапе разработки выполняется макет устройства для более низкочастотного диапазона, где проблемы измерения характеристик решаются проще, чем для К-диапазона. Это позволит выявить некоторые особенности передачи сигналов по цепям схемы, структуру электромагнитного поля в сложных конструкциях распределенных элементов и структур, и использовать знание этих особенностей при проектировании на миллиметровом диапазоне.

Целесообразным представляется комбинация указанных методов, что позволит упростить оценивание характеристик проектируемого узла и проектирование узла в целом.

Предлагаемая методика проектирования узла радиотракта К-диапазона СВЧ можно представить так:

1. выполнение цифровой модели узла на дециметровом диапазоне, оценка характеристик модели, ее оптимизация;
2. реализация макета узла в соответствии с выполненной моделью, экспериментальное исследование характеристик макета;
3. сопоставление результатов моделирования и макетирование, анализ предсказуемости результатов макетирования по известным результатам моделирования;
4. создание цифровой модели узла для К-диапазона на основании полученных результатов макетирования и моделирования, оптимизация характеристик модели;
5. разработка макета узла для К-диапазона на основании моделирования и результатов макетирования и моделирования в дециметровом диапазоне;
6. испытания макета в составе радиотракта;
7. анализ результатов проектирования.

При использовании данной методики следует учитывать некоторые требования:

1. геометрия распределенных элементов и структур должна быть как можно более схожей как в моделях узла обоих частотных диапазонов, так и в его макетах;
2. моделирование должно быть выполнено в одном и том же моделирующем пакете с применением одинаковых элементов для выполнения моделей распределенных и сосредоточенных элементов;
3. должна быть обеспечена близость свойств материалов макетов.

Методика позволит на основании сопоставления результатов моделирования и макетирования смесителя дециметрового диапазона предсказать, насколько близкими к макетным будут характеристики модели смесителя миллиметрового диапазона.

Для обсуждения предлагаемой методики и анализа результатов проектирования в качестве примера рассмотрим проектирование субгармонического диодного смесителя радиорелейной станции К-диапазона.

Одной из наиболее часто используемых схем субгармонического смесителя является смеситель на антипараллельных диодах (рисунок 2).

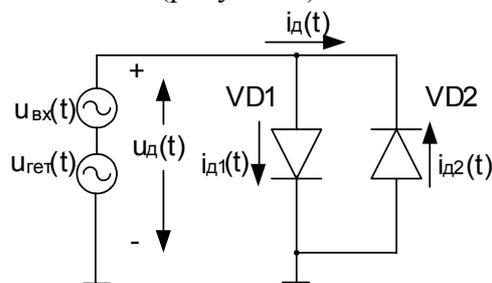


Рисунок 2 – Нелинейный элемент субгармонического смесителя на антипараллельных диодах

Применение антипараллельной структуры позволит достичь потерь преобразования смесителя, работающего на второй гармонике сигнала гетеродина, того же порядка, что и в смесителях, работающих на основной гармонике.

Реализация концепции построения смесителя на антипараллельных диодах требует создания схемы суммирования входного сигнала и сигнала гетеродина при одновременной развязке источников этих сигналов между собой и цепей промежуточной частоты. Благодаря тому, что промежуточная частота $f_{пч}$ значительно ниже частоты входного сигнала, откуда следует близость $f_{вх}$ и $2f_{гет}$, может быть создана структура из двух полуволновых (на длине волны входного сигнала) линий, которая удовлетворяет указанным требованиям. Схема смесителя на таком суммирующем и развязывающем устройстве приведена на рисунке 3.

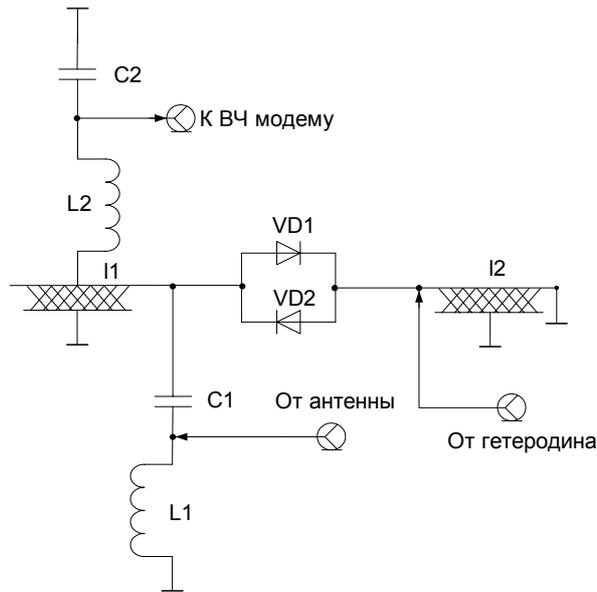


Рисунок 3 – Принципиальная схема субгармонического смесителя дециметрового диапазона

Линия I_1 – разомкнутая четвертьволновая для сигнала гетеродина, I_2 – короткозамкнутая четвертьволновая соответственно. Резонансные свойства этих линий на частоте входного сигнала и частоте сигнала гетеродина обеспечивают взаимную развязку источников этих сигналов. Утечку этих сигналов в цепи промежуточной частоты предотвращает индуктивность L_2 , которая совместно с C_2 образует простейший фильтр промежуточной частоты. Элементы C_1 и L_1 обеспечивают согласование источника входного сигнала с активным элементом смесителя.

Цифровое моделирование смесителя выполнено в среде инженерного пакета Microwave Office 2002. Схема модели и ее компонентов приведена на рисунках 4 и 5.

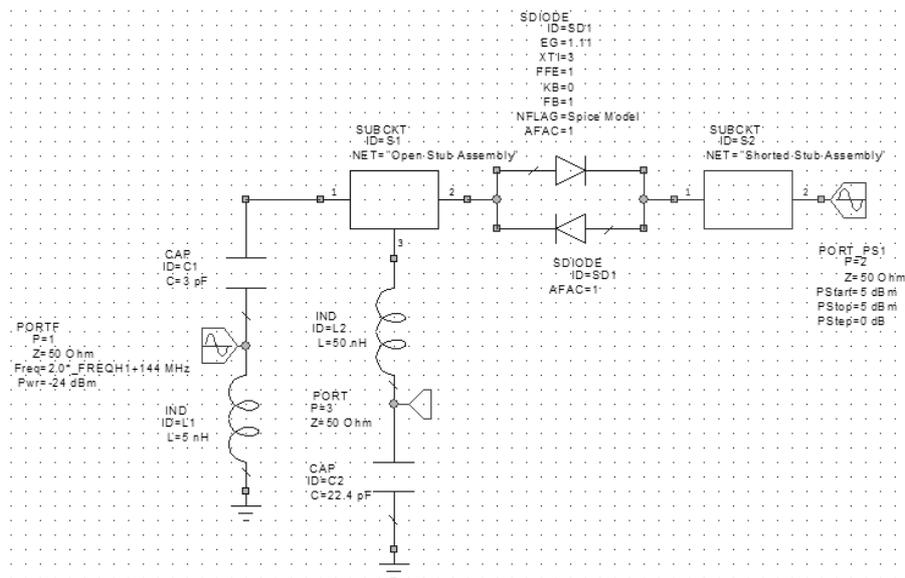


Рисунок 4 – Схема исследуемой модели смесителя

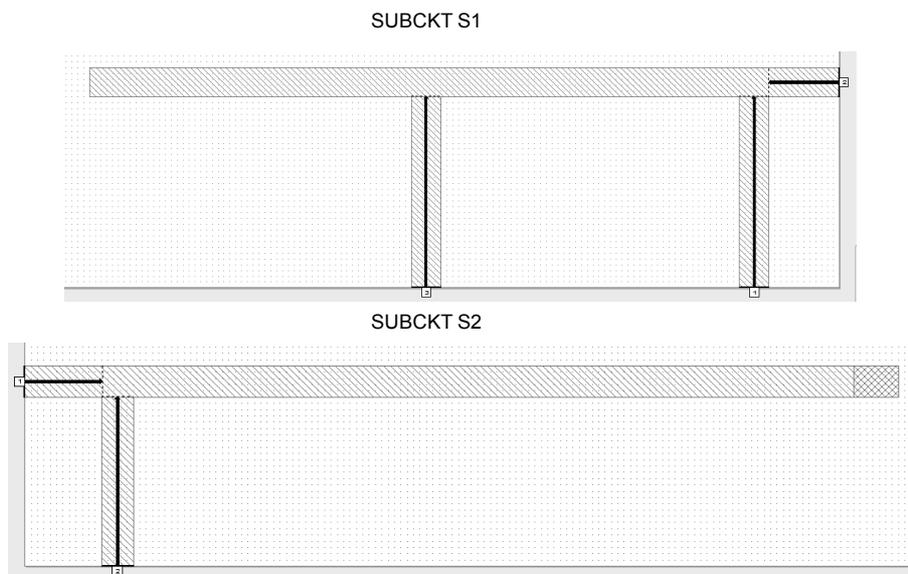


Рисунок 5 – Топология линий SUBCKT1 и SUBCKT2

Макет смесителя для низкочастотной модели ($f_{вх} \approx 1,3 \text{ ГГц}$) представлен на рисунке 6.

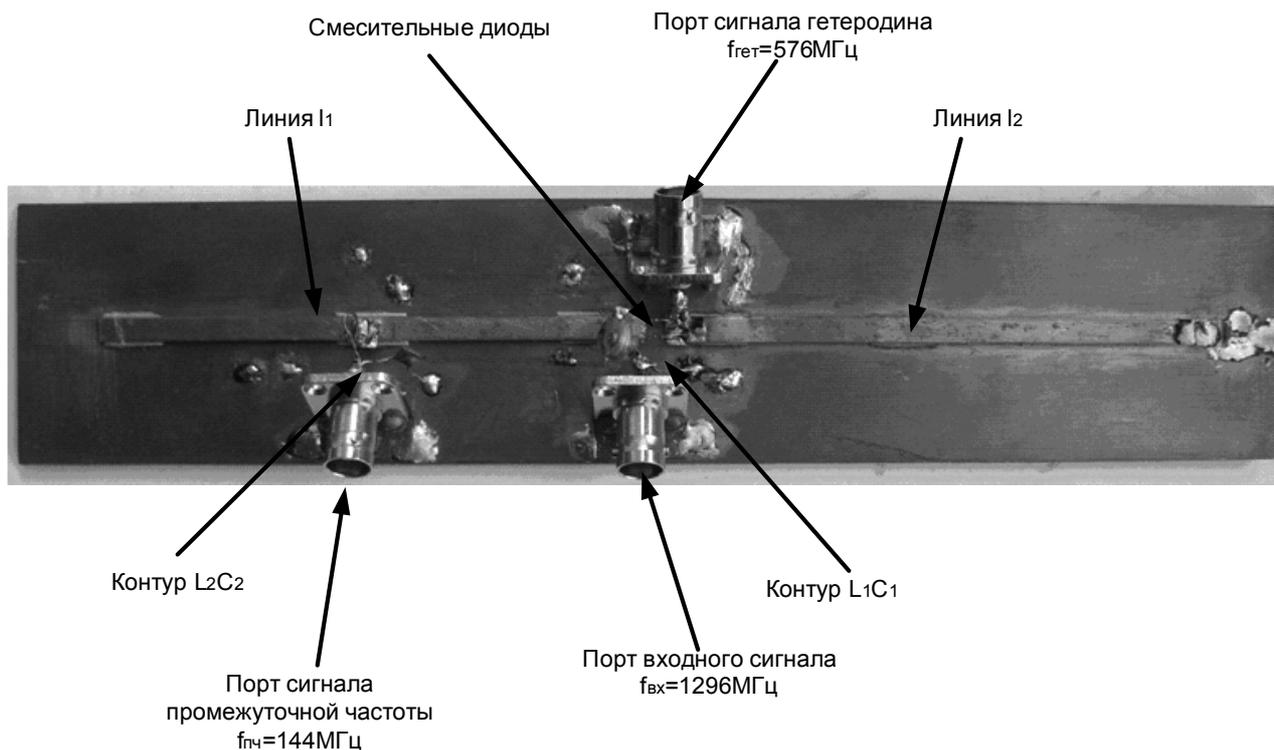
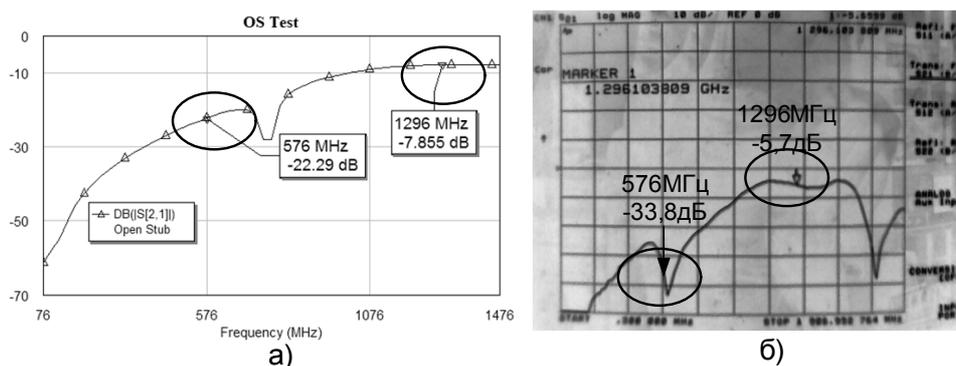


Рисунок 6 – Макет смесителя для низкочастотной модели

Получены следующие результаты исследования смесителя в дециметровом диапазоне длин волн:

1. потери преобразования, полученные на цифровой модели в пакете Microwave Office и на макете, практически идентичны: 9,4дБ и 11,8дБ соответственно;
2. характеристики передачи цепей развязки, выполненных на микрополосковых линиях, близки в исследуемом диапазоне частот (рисунок 7);
3. эквивалентность коэффициентов развязки и согласования цепей сигналов.



а – график, полученный при моделировании, б – экспериментальный график
 Рисунок 7 – Зависимость коэффициента передачи S_{21} от частоты сигнала

При близости геометрии микрополосковых линий смесителя и свойств их материалов дециметрового и миллиметрового диапазонов, можно предположить, что характеристики модели смесителя, выполненной в Microwave Office, будут незначительно отличаться от характеристик макета.

Исследование и оптимизация модели смесителя для К-диапазона проводилась аналогично модели дециметрового диапазона. Частота входного сигнала составляет 47,089ГГц, сигнала гетеродина – 23,328ГГц, сигнала промежуточной частоты – 433МГц. Полученный коэффициент передачи модели смесителя составляет -12дБ.

Достигнутые коэффициенты развязки цепей сигналов таковы:

- развязка входной сигнал – сигнал гетеродина: -34,9дБ;
- развязка сигнал гетеродина – входной сигнал: -38,2дБ;
- развязка сигнал гетеродина – сигнал промежуточной частоты: -92,2дБ;
- развязка сигнал промежуточной частоты – сигнал гетеродина: -113дБ;
- развязка входной сигнал – сигнал промежуточной частоты на частоте 47,09ГГц: -86,4дБ;
- развязка входной сигнал – сигнал промежуточной частоты на частоте 433МГц: -0,9дБ;
- развязка сигнал промежуточной частоты – входной сигнал: -0,9дБ.

Все величины развязки цепей сигналов достаточно велики для того, чтобы уровень проникающей помехи в цепи смесителя был достаточно мал. Исключение составляет развязка входного сигнала и сигнала промежуточной частоты на частоте сигнала промежуточной частоты. Эта проблема, однако, может быть решена за счет использования полосового фильтра, который располагается непосредственно после антенны и подавляет помехи.

Выводы.

Результаты цифровой модели смесителя для дециметрового диапазона длин волн, полученные в моделирующем пакете Microwave Office, сходны с результатами макета смесителя: наблюдается близость основных характеристик смесителя, в частности, потери преобразования и величины цепей развязки. Поэтому с учетом близости свойства материалов макетов в обоих частотных диапазонах, а также геометрии линий, как в моделях, так и в макетах, и использования одинаковых моделей элементов смесителя в моделирующем пакете для обоих частотных диапазонов можно ожидать характеристик макета смесителя миллиметрового диапазона длин волн, схожих с характеристиками его цифровой модели.

При получении удовлетворительных результатов с использованием данной методики существует два возможных варианта дальнейшего продолжения исследований:

1. включение всех узлов радиотракта в структуру приемопередатчика, проведение исследования работоспособности системы путем оценки характеристик полученного сигнала промежуточной частоты;

2. разовое использование измерительной аппаратуры для исследования характеристик макета смесителя миллиметрового диапазона.

Первый способ проще, однако, не дает достаточной информации для проектирования приемопередающего тракта, но может быть использован в качестве промежуточной оценки потерь преобразования.

Литература

1. Проектирование радиоприемных устройств: Учебное пособие для студентов радиотехнических специальностей вузов / А.П. Сиверс, С.М. Клич, А.С. Кривенко и др.; под ред. А.П. Сиверса. – М.: Советское радио, 1976г. – 482с.
2. Эткин, В.С. Полупроводниковые параметрические усилители и преобразователи СВ: Учебник для вузов / В.С. Эткин, А.С. Берлин. – М.: Радио и связь, 1983г. – 348с.
3. Ville S. Möttönen, Receiver front-end circuits and components for millimeter and submillimeter wavelengths, Helsinki University of Technology Radio Laboratory Publications, Dissertation for the Degree of Doctor of Science in Technology, Espoo, Finland, <http://lib.tkk.fi/Diss/2005/isbn951227616X/isbn951227616X.pdf>
4. Design of a low noise integrated sub-harmonic mixer at 183GHz using European Schottky Diode Technology, Hui Wang, Jean-Marc Rollin, Byron Alderman, Alain Maestrini, 4th ESA workshop on millimeter wave technology and applications, Espoo, Finland, February, 2006, http://lerma7.obspm.fr/~maestrini/Work/Publications_files/ESA-Workshop-2006.pdf
5. Kuhne, M. Transverter for 47GHz [Text] / M. Kuhne // DUBUS. – 1992. – №1. – с.45.

Abstract

Vorontsov A.G., Levchenko L.V. Nodes design methodic justification for millimeter wavelengths radio tract transceivers. UHF nodes design methodic for telecommunication hardware justified in the work. It includes digital modeling and frequency scaling methods. Diode millimeter wavelengths radio tract transceiver mixer developed as an example using the methodic.

Keywords: *digital modeling, frequency scaling, subharmonic mixer, conversion losses, signal circuits isolation.*

Анотація

Воронцов О.Г., Левченко Л.В. Обґрунтування методики проектування вузлів прийомопередавальної апаратури радіотракта міліметрового діапазону. У роботі обґрунтована методика проектування НВЧ-вузлів апаратури зв'язку на прикладі діодного змішувача прийомопередавального тракту міліметрового діапазону довжин хвиль. В основу методики покладені методи масштабного макетування і цифрового моделювання.

Ключові слова: *цифрове моделювання, масштабне макетування, субгармоніковий змішувач, втрати перетворення, розв'язання ланцюгів сигналів.*

Здано в редакцію:
16.04.2010р.

Рекомендовано до друку:
д.т.н, проф. Зорі А.А.