

ПОВЫШЕНИЕ СТАБИЛЬНОСТИ ЧАСТОТЫ МИКРОВОЛНОВОГО ГЕНЕРАТОРА

Рассматривается зависимость фазовой ошибки измерений флуктуаций набега фазы сигналов на трассе распространения микроволн от нестабильности микроволнового генератора входящего в состав измерительной установки, реализующей гомодинный метод измерения флуктуации амплитуды и набега фазы сигнала в приземном атмосферном слое.

Гомодинные методы измерения амплитуды и набега фазы сигналов относятся к классу радиоволновых, и являются на сегодняшний день одними из самых прогрессивных методов, которые могут найти применение во многих отраслях науки и техники [1]. Отличительной чертой данных методов является то, что имеется возможность производить измерение не только амплитуды электромагнитной волны, прошедшей через исследуемый объект, но так же, что самое существенное – ее фазы. Это дает возможность помимо решения чисто прикладных задач промышленности, медицины, экологии, более тонко исследовать процессы распространения микроволн на открытых трассах [2, 3].

Для достижения высокой стабильности частоты микроволнового генератора могут применяться различные схемотехнические решения, связанные с использованием диэлектрических и объемных высокочастотных резонаторов, что приводит к некоторому увеличению стабильности частоты. Фазовые шумы в ближней зоне подобного генератора получаются невысокими, что и обусловило широкое использование подобного подхода при построении радиотехнических систем различного назначения. Однако стабильность частоты микроволнового генератора можно повышать подобным методом до определенного предела, которого может оказаться недостаточно для проведения научных исследований по распространению микроволн на протяженных открытых трассах. Можно использовать высокостабильный генератор с последующим умножением частоты до необходимого значения, но спектр такого генератора имеет достаточно высокий уровень гармонических и комбинационных составляющих даже при хорошей фильтрации, а также высокий уровень шума в ближней зоне, что недопустимо при проведении фазовых измерений.

Рассмотрим влияние нестабильности частоты микроволнового генератора на точность фазовых измерений в установке, реализующей гомодинный метод.

Кумулятивная фаза сигнала при прохождении электромагнитной волны расстояния d равна $\Phi = k \cdot d$, где $k = 2\pi/\lambda$ – волновое число. Так как гомодинный метод измерения флуктуации фазы подразумевает переизлучение исходного сигнала, то в процессе измерения фазы, электромагнитная волна проходит расстояние равное $2d$, тогда статическая фазовая ошибка системы, вызванная нестабильностью частоты микроволнового генератора, при измерении фазы в канале протяженностью d определяется по формуле $\Delta\phi = 4\pi \cdot f \cdot \delta \cdot d / c$, где f – частота сигнала, на которой проводятся фазовые измерения; δ – относительная нестабильность частоты микроволнового генератора; c – скорость распространения электромагнитной волны.

На основе полученного выражения приведем зависимости фазовых ошибок от протяженности исследуемого канала при использовании различных схемотехнических решений при построении микроволнового генератора. Все зависимости построены для частоты 9,3 ГГц. Для сравнения выбраны различные схемы построения генераторов, каждая из которых обладает собственной нестабильностью частоты сигнала. Исходные данные для сравнительного анализа приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Средние значения нестабильности частоты микроволнового генератора от варианта исполнения

Вариант исполнения микроволнового генератора	Нестабильность частоты, $\Delta f / f$
Генератор на AsGa транзисторе с барьером Шоттки	$3 \cdot 10^{-4}$
Генератор на отражательном клистроне	$1 \cdot 10^{-4}$
Генератор на AsGa транзисторе с барьером Шоттки с диэлектрическим резонатором	$5 \cdot 10^{-5}$
Полупроводниковый или клистронный генератор с кольцом ФАПЧ и опорным кварцевым генератором	$1 \cdot 10^{-6}$
Полупроводниковый или клистронный генератор с кольцом ФАПЧ и опорным термостатированным кварцевым генератором	$2 \cdot 10^{-8}$

Графики зависимости фазовой ошибки от протяженности исследуемого канала при различном варианте исполнения микроволнового генератора изображены на рисунке 1.

На рисунке 2 показаны графики, поясняющие, с каким значением нестабильности частоты необходимо реализовать микроволновый генератор, чтобы получить необходимую ошибку измерения фазы, при заданном значении протяженности трассы.

Анализируя зависимости, приведенные на рисунках 1, 2, можно сделать следующий вывод. Повышение стабильности микроволнового генератора приводит к адекватному увеличению протяженности исследуемого канала, при той же фазовой ошибке измерения.

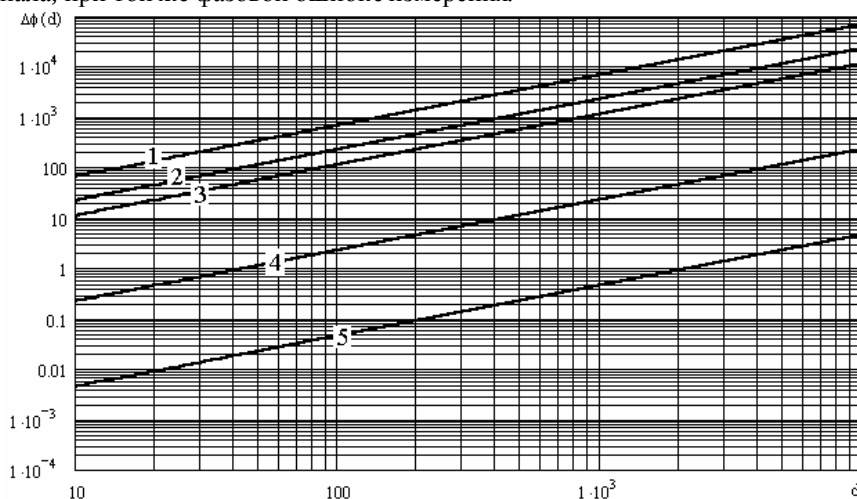


Рисунок 1 – Графики зависимости фазовой ошибки от протяженности исследуемого канала при различном варианте исполнения микроволнового генератора (1 - генератор на AsGa транзисторе с барьером Шоттки; 2 - генератор на отражательном клистроне;

3 - генератор на AsGa транзисторе с барьером Шоттки с диэлектрическим резонатором; 4 - полупроводниковый или клистронный генератор с кольцом ФАПЧ и опорным кварцевым генератором; 5 - полупроводниковый или клистронный генератор с кольцом ФАПЧ и опорным термостатированным кварцевым генератором)

Для коротких трасс (10...50 м) измерения с фазовой ошибкой 10...50° можно проводить используя генератор на отражательном клистроне, что и было сделано при проведении эксперимента по определению флуктуации набега фазы и амплитуды в приземном слое атмосферного канала весной 2003 года, на частоте 9,3 ГГц [3]. Протяженность исследуемого канала в данном случае была невелика (порядка 50 м), что обуславливалось невысокой стабильностью частоты применяемого клистронного генератора. Инструментальная точность установки по определению фазы равнялась $2\pi/256 = 1,4^\circ$. Инструментальная точность выбиралась исходя из соображений построения блока фазового детектора, который был реализован на 8-ми битном микроконтроллере. Подсчет фазовых циклов и значение фазы в рамках 2π выполнялось программно.

Благодаря достижениям современной радиоэлектроники можно значительно повысить стабильность частоты применяемого клистронного генератора посредством введения кольца фазовой автоподстройки

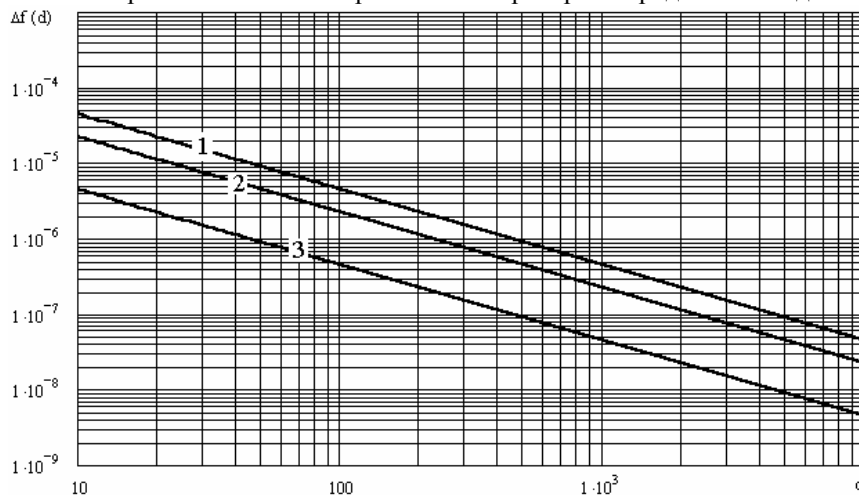


Рисунок 2 – Зависимость необходимого значения нестабильности частоты микроволнового генератора от выбранной протяженности исследуемой трассы, для различных значений фазовых ошибок (1 - ошибка измерения фазы равна 10°; 2 - 5°; 3 - 1°)

частоты (ФАПЧ), что до недавних пор было практически нереализуемо. В качестве опорного генератора, в данном случае, может применяться любой высокостабильный высокочастотный генератор, например, кварцевый, или кварцевый термостатированный генератор.

При протяженности исследуемых атмосферных трасс 100...1000 м для частоты излучения 10 ГГц с фазовой ошибкой измерения порядка 1°, нестабильность частоты микроволнового генератора должна быть не хуже $1 \cdot 10^{-7}$,

что еще допускает применение кварцевого генератора в кольце ФАПЧ. При исследовании трасс протяженностью 1000...5000 м, с фазовой ошибкой не более 1°, необходимо применять микроволновые генераторы с нестабильностью частоты не хуже $5 \cdot 10^{-8} \dots 1 \cdot 10^{-8}$, что подразумевает применение в качестве опорного генератора кольца ФАПЧ уже термостатированного кварцевого генератора.

В свою очередь, точность, с которой производятся фазовые измерения, зависит от технических характеристик установки (погрешность фазовращателя, фазового детектора и т.д.), поэтому задаваться относительно большой точностью не следует.

Выбор отражательного клистрона в качестве СВЧ-генератора для установки объясняется в первую очередь малым уровнем шумов в спектре выходного сигнала клистрона, что немаловажно для фазовых измерений. Возможность электронной перестройки частоты генерации отражательного клистрона необходима для построения схемы ФАПЧ. Простота реализации и надежность, присущая клистронным генераторам тоже являются критерием для выбора генератора, тем более, что продолжительность планируемых экспериментов может достигать нескольких лет, при условии, что установка должна работать непрерывно [4].

При реализации схемы ФАПЧ для частот порядка 10 ГГц существует ряд трудностей. Во-первых, необходим сверхвысокочастотный делитель, который делил бы частоту генератора до значения, с которого начинают работать современные синтезаторы частоты, использующие ФАПЧ. Во-вторых, так как в отражательном клистроне, электронная перестройка частоты осуществляется посредством изменения напряжения на отражателе, которое составляет порядка $-150... -250$ В, то для автоматической подстройки частоты необходимо применять усилители, у которых входные и выходные каскады не имеют гальванической связи. Каскады при этом имеют разделенные цепи питания.

Функциональная схема высокостабильного клистронного генератора изображена на рисунке 3.

Часть СВЧ сигнала частотой 9,3 ГГц, генерируемого отражательным клистроном, отбирается направленным ответвителем и поступает на делитель частоты на 4, выполненный на микросхеме CND2050. Верхнее граничное значение частоты микросхемы составляет 10 ГГц. Делитель СВЧ сигнала на 4 выбран из соображений использования в схеме интегрального синтезатора частоты (UMA1020M), у которого верхняя рабочая частота составляет 2,5 ГГц.

Опорным генератором для фазового детектора синтезатора частоты служит термостатированный кварцевый генератор «Сонет», долговременная нестабильность частоты которого равна $2 \cdot 10^{-8}$. В зависимости от расстройки генераторов по частоте, постоянное напряжение на выходе фазового детектора синтезатора линейно изменяется от 0 до 5 В. Далее это управляющее напряжение усиливается и поступает на формирователь напряжения, на выходе которого управляющее напряжение изменяется от -15 до $+15$ В. Это необходимо для того, чтобы расширить динамический диапазон по цепи управления отражателем клистрона, а также, чтобы иметь возможность компенсировать уход частоты клистрона как вниз, так и вверх от среднего значения.

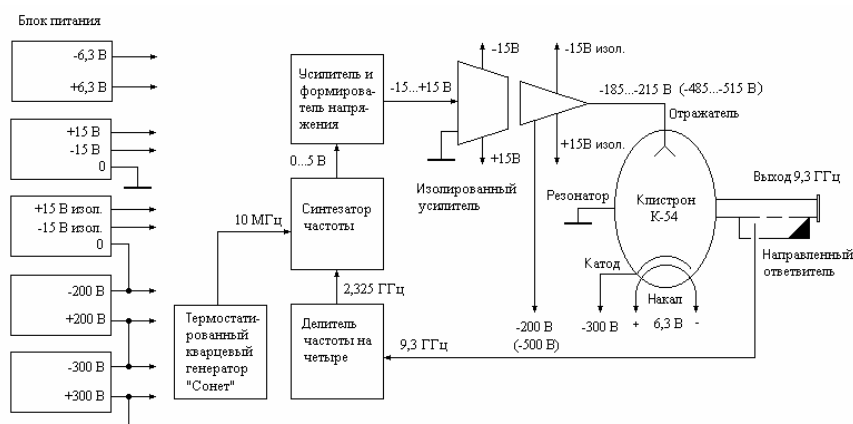


Рисунок 3 – Функциональная схема высокостабильного клистронного генератора

Управление частотой клистрона происходит посредством изменения напряжения на отражателе. Так как напряжение отражателя достаточно высокое ($-150... -250$ В относительно катода или $-450... -550$ В относительно анода, который как правило заземлен), то в схеме применен изолированный усилитель, выполненный на микросхеме ISO122P. Входные и выходные каскады данного усилителя гальванически развязаны и выдерживают разность потенциалов до 1000 В. Общий провод выходного каскада усилителя соединен с источником напряжения -200 В, что дает изменение выходного напряжения усилителя от -185 до -215 при изменении входного от -15 до $+15$ В. С выхода изолированного усилителя напряжение поступает на отражатель клистрона, и компенсирует уход частоты генерации.

Требования к блоку питания клистронного генератора достаточно высоки. Пульсации по цепям питания клистрона должны быть сведены к минимуму, иначе выходной сигнал клистрона будет модулирован напряжением пульсаций. Стабилизация питающего напряжения обязательна, так как это повлечет за собой изменение амплитуды СВЧ сигнала, что недопустимо исходя из того, что установка реализует измерение не только флуктуации фазы, но и амплитуды сигнала.

Требования к блоку питания клистронного генератора достаточно высоки. Пульсации по цепям питания клистрона должны быть сведены к минимуму, иначе выходной сигнал клистрона будет модулирован напряжением пульсаций. Стабилизация питающего напряжения обязательна, так как это повлечет за собой изменение амплитуды СВЧ сигнала, что недопустимо исходя из того, что установка реализует измерение не только флуктуации фазы, но и амплитуды сигнала.

В работе теоретически показано, что протяженность исследуемой трассы прямо пропорционально зависит от нестабильности частоты генератора. Показано, что без применения автоматической подстройки частоты реализовать высокостабильный микроволновый генератор с хорошим выходным спектром очень трудно, но с появлением современных микроволновых радиоэлектронных компонентов эта задача становится вполне выполнимой.

Приведена функциональная схема генератора на отражательном клистроне, который посредством введения кольца ФАПЧ генерирует СВЧ колебания с нестабильностью частоты, определяемой внешним опорным генератором. В рассматриваемом случае нестабильность частоты клистронного генератора определяется нестабильностью кварцевого термостатированного генератора «Сонет», которая равна $2 \cdot 10^{-8}$, что дает возможность проводить фазовые измерения на частоте 10 ГГц с помощью гомодинного метода на трассах протяженностью 1000...5000 м, с фазовой ошибкой порядка 1° .

В дальнейшем предполагается разработать полупроводниковый микроволновый генератор с ФАПЧ, который схемотехнически является более простым и имеет меньшие габариты по сравнению с клистронным генератором. Создание полупроводникового микроволнового генератора сопряжено с рядом трудностей связанных с минимизацией фазовых шумов генератора в ближней зоне. Однако применение комбинированных методов стабилизации частоты генератора позволит учесть эту особенность и свести уровень фазового шума к минимуму.

Библиографический список

1. Широков И.Б. Принципы реализации и область применения гомодинных методов измерений / И.Б. Широков, Д.В. Сеницын, О.В. Шабалина // КрыМиКо'04. — Сб. трудов конф. — Севастополь, 13–17 сентября 2004 г. — С. 635 – 627.
2. Shirokov I.B. Amplitude and Phase Progression Measurements on Microwave Line-of-Sight Links / I.B. Shirokov, M.V. Ivashina // IGARSS'01. — Conf. Proceedings. Sydney, Australia, 9-13 July 2001. — Sydney, 2001. — 364p.
3. Shirokov I.B. Experimental Investigations of Amplitude and Phase Progression Fluctuations on Microwave Line-of-Sight Links in Relation with Natural Medium Condition / I.B. Shirokov, S.A. Shaban, S.N. Polivkin, D.V. Sinitsyn // IGARSS'03. — Conf. Proceedings, Toulouse, France, 21-25 July 2003. — Toulouse, 2003. — V. VII. — P. 4177 – 4179.
4. Кауфман М.С. Электронные приборы / М.С. Кауфман, Н.И. Палатов. — М.: Энергия, 1970. — 480с.

Поступила в редакцию 14.02.2005 г.