

## **Выбор оптимального соотношения баз и разбиения на поддиапазоны в широкополосном измерителе частоты**

*Представлены результаты моделирования моноимпульсного измерителя частоты на основе многошкального дискриминатора с разбиением рабочей полосы по диапазонам. Дискриминатор был построен по классической схеме квадратурного фазового детектора на основе полупроводниковых детекторных диодов. В процессе разработки производилось трехмерное электромагнитное моделирование и нелинейный схемотехнический анализ. Целью работы было определение оптимального соотношения баз для устранения аномальных ошибок определения частоты.*

**Ключевые слова:** измеритель частоты, сверхширокополосный дискриминатор

В докладе будут рассмотрены методы измерения частоты СВЧ сигналов в широкой полосе с помощью устройств, называемых моноимпульсными измерителями частоты (МИЧ). Основной характеристикой таких устройств является мгновенная полоса: диапазон частот, в котором возможно определение с заданной точностью частоты радиоимпульса с некоторой минимальной длительностью.

Рассмотрев примеры подобных устройств: FDFD7409-2 (Api tech.), ADC-60180 (AdComm Inc.), A55-MH024 (Akon Inc.), — можно определить параметры, которые определяют современное состояние данной области техники. Минимальная длительность импульса 50 нс, точность  $\pm 3$  МГц, мгновенная полоса от 1-2 до 18 ГГц.

Одним из компонентов МИЧ (наряду с входным трактом, амплитудным детектором и системой обработки), непосредственно выполняющим функцию измерения частоты и во многом определяющим характеристики устройства в целом, является частотный дискриминатор. При проектировании дискриминатора особое внимание должно уделяться возможности измерения коротких импульсов и достижения высокой точности измерения частоты.

Для моделирования была выбрана схема квадратурного фазового детектора на основе полупроводниковых диодов. Данная схема является классической и при ее разработке удалось добиться хороших результатов.

Схема показана на рис. 1. В ее состав входят детекторные диоды, детектирующие набег фазы на линии задержки в виде  $1+A*\sin(\phi)$ ,  $1-A*\sin(\phi)$ ,  $1+A*\cos(\phi)$  и  $1-A*\cos(\phi)$ . С помощью системы обработки видеосигналов можно найти отношение сигналов, исключив амплитуду, и произвести вычисление арктангенса (либо сравнить знаки синуса и косинуса), определив, таким образом, фазу сигнала.

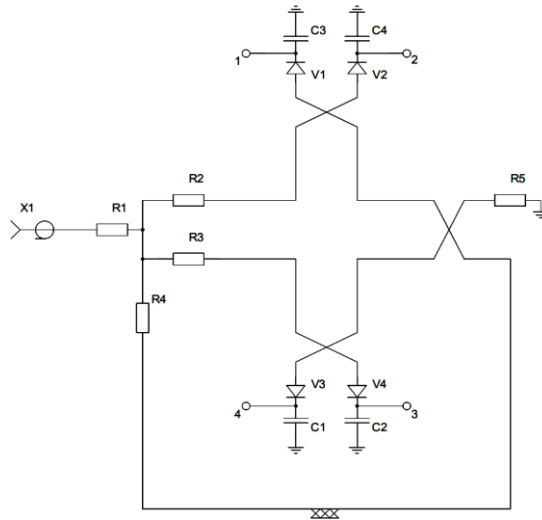


Рисунок 1

Для достижения высокой точности определения частоты требуется применение длинной линии задержки. Ошибка по частоте выражается из фазовой ошибки по формуле

$$\Delta f = \frac{\delta\varphi}{2\pi\tau} \quad (1)$$

Соответственно, если известна фазовая ошибка, минимальную длину ЛЗ можно вычислить по формуле (2):

$$L = \frac{c \delta\varphi}{2\pi \sqrt{\epsilon_{эфф}} \Delta f} \quad (2)$$

Были рассмотрены варианты исполнения линий задержки: органика (RO4350), коаксиальные кабели, волоконно-оптическая линия задержки. Был также рассмотрен вариант выполнения линии задержки на керамической подложке (поликор): для развязки частей ЛЗ в керамике выполняются металлизированные отверстия (рисунок 2).

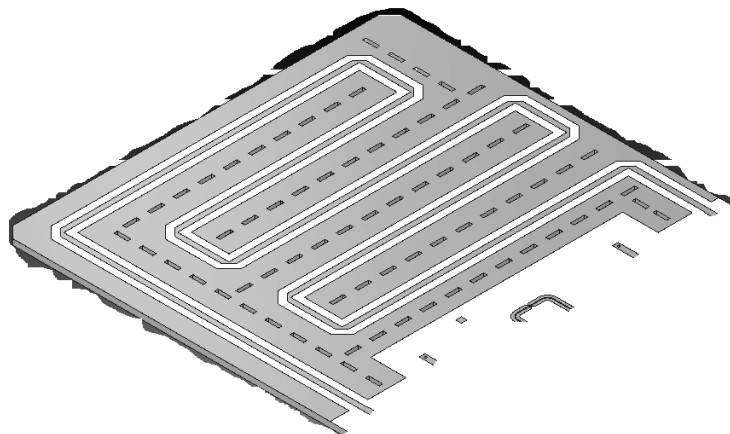


Рисунок 2

Одним из вариантов реализации дискриминатора является использование линий задержки с длинами, кратными степеням двойки. Обработка видеосигнала в таком случае

реализуется с помощью простых компараторов, не требует вычислений и хранения каких-либо данных. Однако требуется достаточно большое количество линий с большой длиной, что приводит к увеличению габаритов. Другой вариант — использование АЦП для точного определения амплитуды видеосигналов и вычисление частоты по показаниям нескольких линий задержки выборкой значения из памяти. В таком случае возникает вопрос о выборе длин линий задержки. Один из вариантов – выбор графическим методом.

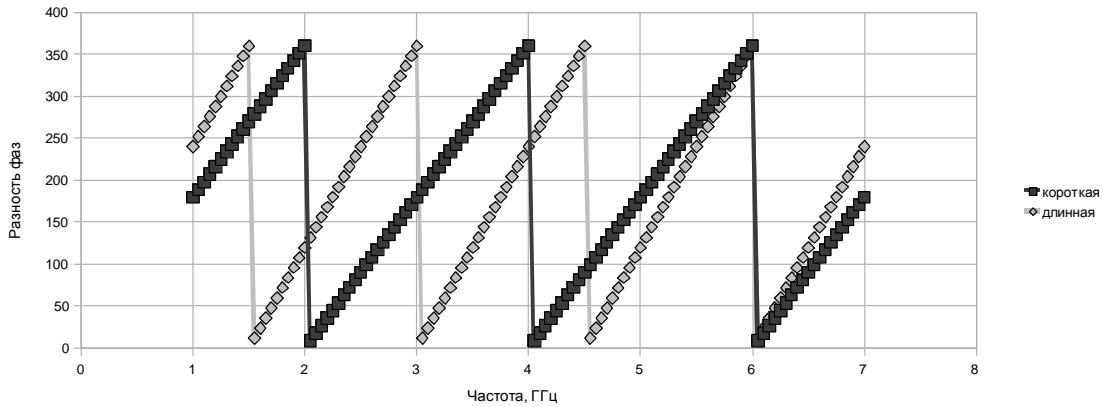


Рисунок 3

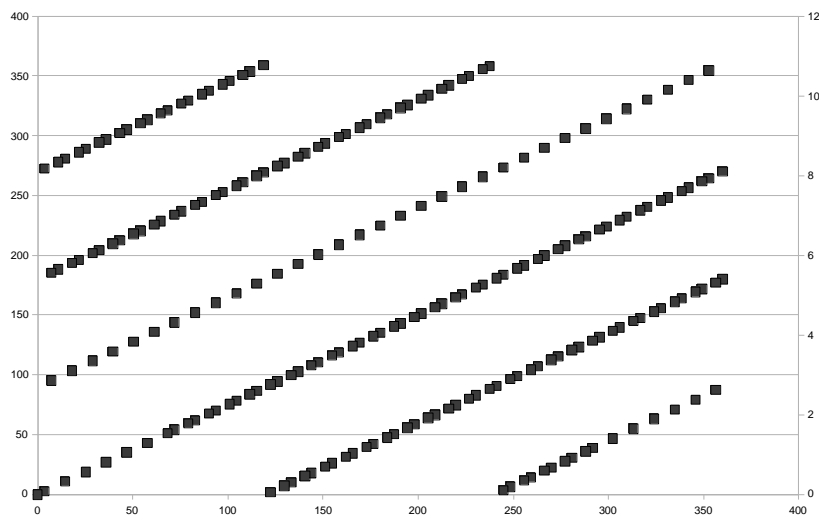


Рисунок 4

Данные зависимости фазы от частоты (рис. 3) с двух ЛЗ отображаются на графике, по осям которого откладываются измеренные значения фаз для одной и второй ЛЗ, соответственно. Каждая точка соответствует значению частоты, задаваемой двумя величинами разности фаз (рисунок 4). Минимальное число ЛЗ, необходимое для такого метода, равно двум. Однако на практике необходимо учитывать ошибки определения фазы и неравномерность зависимости частота/фаза, приводящее к возникновению аномальных ошибок. Предварительный анализ показал возможные причины неравномерности: переотражения сигнала, главным образом из-за неудовлетворительного согласования детекторов, неравномерность АЧХ и низкое значение развязки квадратурных делителей. В первую очередь было рассмотрено влияние согласованности детектора на форму фазовых графиков (рис. 5):

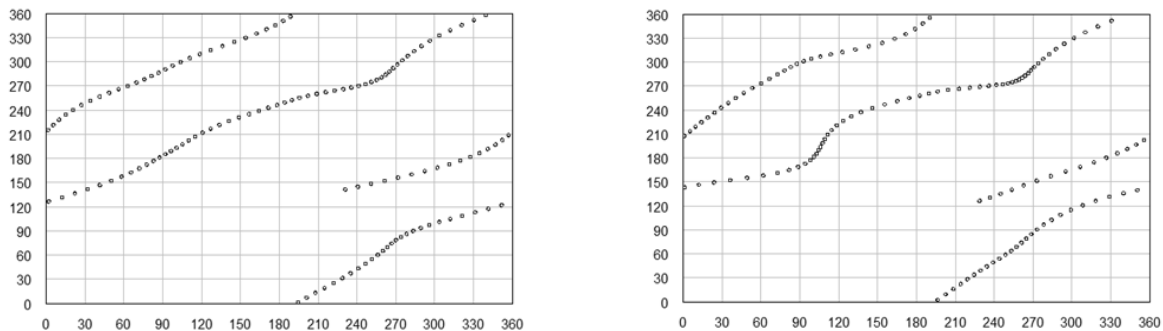


Рисунок 5

На рисунке показаны фазовые графики для  $KCV = 1.7:1$  (левый график) и  $KCV = 3.5:1$

Влияние неравномерности квадратурного делителя на форму фазовых графиков показано на рис. 6. На графиках показана АЧХ блока ответвителей между входом линии задержки и каждым из выходов детектора, а также показана выходная фаза.

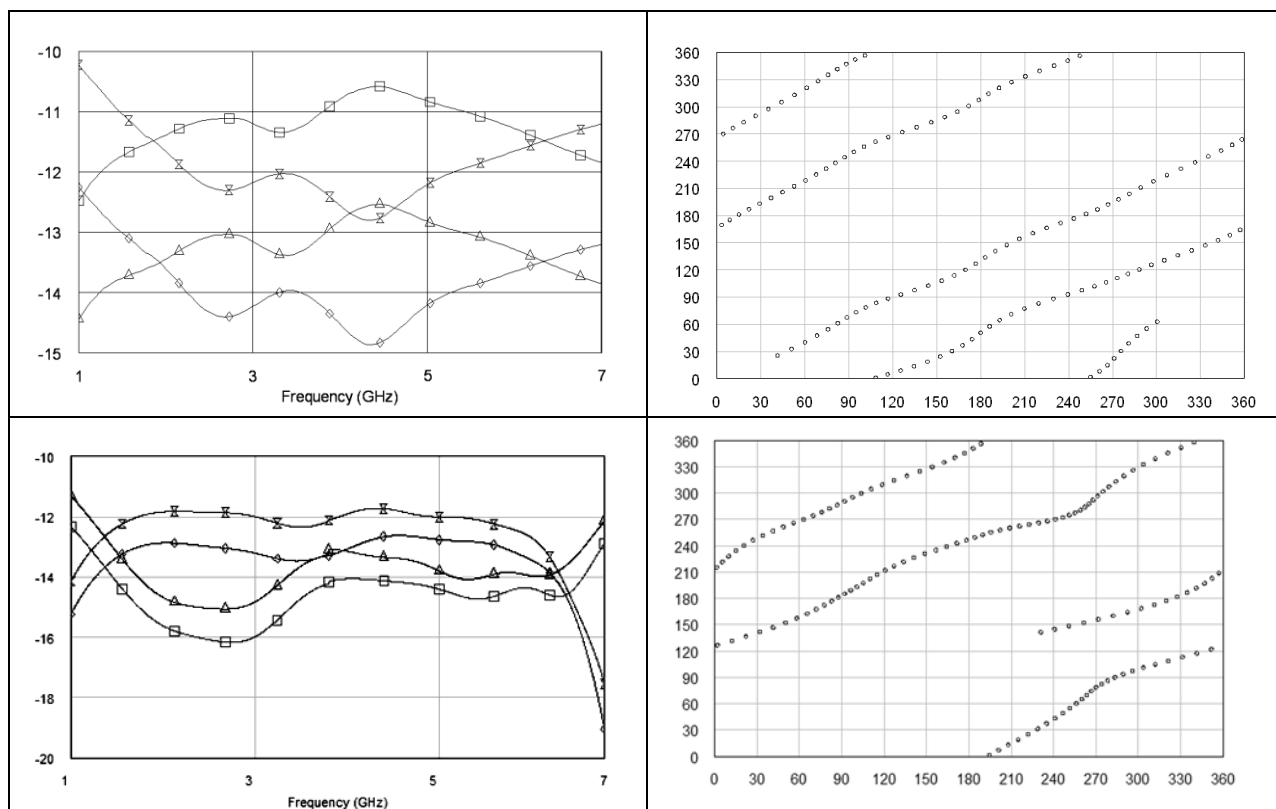


Рисунок 6

На данных графиках можно видеть неравномерность АЧХ коррелятора, которая составляет до 2 дБ в первом случае и до 4 дБ во втором.

Можно сделать вывод о том, что для достижения высокой точности требуется качественный направленный ответвитель, являющийся относительно узкополосным устройством, следовательно, диапазон рабочих частот было предложено разбить на несколько поддиапазонов. Данное решение также упрощает выбор линий задержки и,

очевидно, делает возможным независимое обнаружение сигналов из разных поддиапазонов.

Рассматривалась разбивка 1-4 / 4-18, 1-5/5-18 и 1-7/7-18 ГГц. Для данных диапазонов были созданы трехмерные электромагнитные модели ответвителей и произведено моделирование устройства в целом методами нелинейного анализа.

После проведения расчетов и моделирования ряда схемотехнических решений удалось добиться потенциальных характеристик, сравнимых с аналогичными характеристиками устройств, изготавливаемых фирмами мирового уровня. Рассмотрена многошкальная схема с оптимальным выбором длин линий задержки, определены причины аномальных ошибок. Следующим этапом работы является экспериментальная проверка данных моделирования.

#### Библиографический список

1. Fifty years of instantaneous frequency measurement, P.W. East, IET Radar Sonar Navig., 2012
2. James Tsui, Digital Techniques for Wideband Receivers. 2004
3. A digital IFM receiver based on sub-nyquist sampling, Haifeng Wang, Youxin Lu, University of electronics science and technology, Chengdu, China, 2010