



УДК 621.356

С.А. Дементьев, студент ФГБОУ ВО «ВГУВТ»
В.И. Логинов, к.т.н., доцент, ФГБОУ ВО «ВГУВТ»
603951, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова 5

АЛГОРИТМЫ ОПТИМИЗАЦИИ И РАСЧЕТА ЧАСТОТНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ПЕРЕНОСЧИКОВ ЧАСТОТ

Ключевые слова: частотное распределение, преобразование частот, ряды Фарея

В работе рассматриваются алгоритмы расчета и оптимизации частотного распределения нелинейных преобразователей частоты и программный комплекс, реализующий эти алгоритмы для двух основных моделей: преобразователя работающего на вычитание диапазона и преобразователя переносчика частот. Приведены примеры расчета и оптимизации частотного распределения и их сравнение с существующими методиками.

В современной приемопередающей аппаратуре широко используется нелинейное преобразование частот. Преобразователь частоты состоит из нелинейного элемента, гетеродина и фильтрующей системы на выходе. Как известно, любой нелинейный элемент при преобразовании частот создает помимо полезного сигнала огромное количество комбинационных составляющих, которые ухудшают параметры канала связи. Уровень комбинационных составляющих зависит от типа преобразователя, параметров выходного фильтра, а также правильного выбора параметров частотного распределения.

Одной из главных проблем в системах связи и телекоммуникации на сегодня является нехватка частотных ресурсов, особенно в крупных городах. Основная причина заключается в неэффективном использовании радиочастотного спектра: число услуг беспроводной связи постоянно растёт и для этого резервируется все новые диапазоны частот, большая часть которых используется от случая к случаю.

Наиболее удачное решение данной проблемы – использование динамического доступа к спектру или "когнитивного радио". Идея заключается в создании системы, которая на основе установленных правил и знаний о своём внутреннем состоянии может корректировать свои параметры динамически и автономно. Чтобы подключиться к такой сети пользователь должен выполнить ряд условий, в числе которых - выбор лучшего из доступных каналов с целью максимизации его пропускной способности. Решение этой задачи в существующих системах когнитивного радио выполняется на основе измерения отношения сигнал/шум, предполагаемого к использованию канала связи, что определяет только внешний фактор функционирования канала.

В работе рассмотрена задача создания алгоритмов и программного обеспечения, предназначенного для оптимизации частотного распределения с учетом прогноза уровня комбинационных помех в канале связи с одноступенчатым двухчастотным преобразованием.

Для удобства анализа комбинационных составляющих в преобразователях частоты используют номограмму частотного распределения [1].

Все известные методики расчета и анализа частотного распределения условно можно разделить на несколько категорий:

- 1) Графо-аналитические методы [2]
- 2) Алгоритмические методы [3]
- 3) Аналитические методы [4]

Основная идея таких методов заключается в получении математических соотношений, связывающих частоты основного преобразования и комбинационные частоты, для чего используются системы уравнений или неравенств. К недостаткам относится трудность алгоритмизации и общая сложность методики, поскольку математические соотношения зависят от порядка учитываемых комбинационных частот и взаимного расположения сигналов на входе преобразователя.

Все рассмотренные методы анализа частотного распределения обладают какими-либо недостатками. Чтобы их избежать, используется алгоритмический метод на основе теории чисел (рядов Фарея).

Для эффективного синтеза номограммы комбинационных частот и получения "пораженных" точек была использована методика [5] основанная на применении рядов Фарея, согласно которой координаты пересечения комбинационных частот с прямыми основного преобразования в интервале $q \in (0,1)$ представляют собой ряд Фарея. Индекс ряда напрямую связан с порядком учитываемых комбинационных частот.

В зависимости от соотношения диапазонов входных и выходных частот нелинейный преобразователь частоты может работать в трех режимах:

- 1) Преобразователь-вычитатели диапазонов входных частот;
- 2) Преобразователь-переносчики диапазона частот;
- 3) Преобразователь-сумматоры входных диапазонов;

При разработке программного обеспечения было принято решение реализовать первые две модели согласно [6].

Модель идеального преобразователя-вычитателя диапазонов

Данная модель представляет собой преобразователь частоты у которого полоса пропускания входного и выходного фильтра равна нулю, а полоса перестройки сигнала и гетеродина ненулевая.

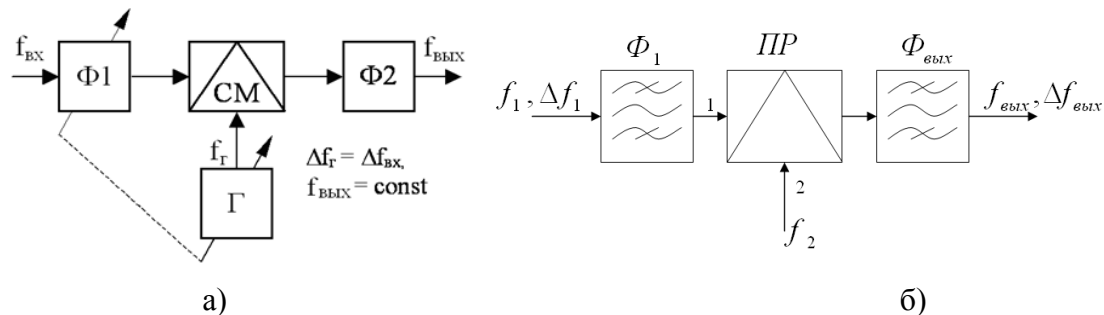


Рис. 1. Схема преобразователя-вычитателя входных диапазонов а) и преобразователя-переносчика диапазона входных частот б)

Сигналы на двух входах преобразователя частоты могут меняться в диапазоне от нижних до верхних значений частот, причем диапазоны их изменения равны:

$$\Delta f_{ВХ} = \Delta f_{Г} = \Delta f, \quad (1)$$

$$\text{где } \Delta f_{ВХ} = f_{ВХв} - f_{ВХн}, \Delta f_{Г} = f_{Гв} - f_{Гн} \quad (2)$$

Положение частот сигнала и гетеродина в их диапазоне перестройки учитывают коэффициенты C_1 и C_2 :

$$C_1 = \frac{f_{ВХ} - f_{ВХн}}{\Delta f} \quad C_2 = \frac{f_{Г} - f_{Гн}}{\Delta f} \quad (3)$$

Чтобы найти оптимальные параметры частотного распределения q_{opt} и Δf_{opt} нелинейного преобразования частоты, необходимо чтобы соотношение смешиваемых частот q находилось в пределах интервала $[C_{min}; C_{max}]$, образованного двумя ближайшими "пораженными" точками:

$$\begin{cases} C_{min} = \frac{q - C_1 \cdot \Delta f^{norm}}{1 + (1 - C_2) \cdot \Delta f^{norm}} \\ C_{max} = \frac{q + (1 - C_1) \cdot \Delta f^{norm}}{1 - C_2 \cdot \Delta f^{norm}} \end{cases} \quad (4)$$

В зависимости от взаимного расположения частот на входе, существует четыре варианта решения системы (4).

Применение модели идеального преобразователя-вычитателя диапазонов позволяет получить предельно допустимые параметры частотного распределения с учётом ограничений на входные и выходные частоты.

Модель преобразователя-переносчика диапазонов

На вход преобразователя ПР подается входной сигнал на частоте f_1 , изменяющийся в диапазоне Δf_1 и сигнал гетеродина на частоте f_2 . Комбинационные составляющие на выходе фильтруются при помощи фильтра $\Phi_{вых}$, полоса пропускания которого совпадает с таковой у фильтра на входе Φ_1 .

Область свободная от комбинационных частот в случае данной модели представляет собой четырехугольник (рис. 2, а). Задача нахождения её максимально допустимой площади решается в два этапа:

- 1) Поиск двух ближайших "пораженных" точек к заданному соотношению смешиваемых частот и комбинационных частот, проходящих через них, используя модель идеального преобразователя-вычитателя (нулевое приближение, $\Delta f_1 = 0$, используются выражения записанные на основе (4), вид которых зависит от взаимного положения входных и комбинационных частот);
- 2) Нахождение оптимальных параметров частотного распределения, которое сводится к "растяжению" области фильтрации до касания ближайших линий комбинационных частот. Данный подход получил название в метода прямых "псевдопреобразований" [6] (рис. 2, б).

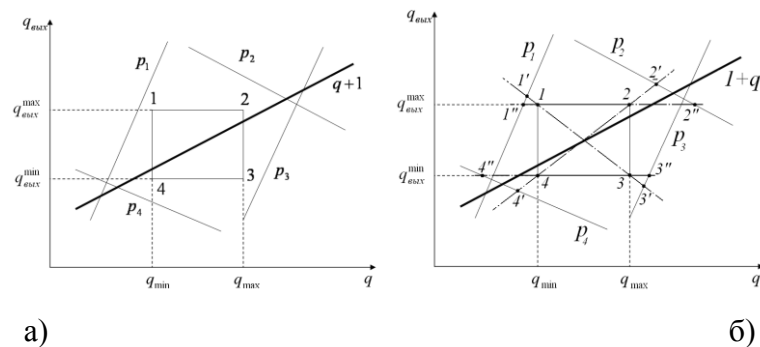


Рис. 2. Исходная область фильтрации преобразователя-переносчика диапазонов входных частот а) и корректировка точек 1 и 2 области при помощи метода прямых "псевдопреобразования" б)

Главными преимуществами метода прямых "псевдопреобразования" является его безитерационность и возможность использования параллельных вычислений.

Программа FDM v3.0

Для решения задач расчета и оптимизации частотного распределения преобразователя частоты с перестраиваемым преселектором была создана программа FDM v3.0 на языке программирования C#. Главные особенности разработанной программы:

- 1) Многооконный графический интерфейс с возможностью динамического пересчета данных при масштабировании окон;

- 2) Синтез номограммы комбинационных частот и получение "пораженных" точек с применением безитерационного алгоритма на основе рядов Фарея;
- 3) Получение точной информации о комбинационных частотах, проходящих через каждую из этих точек;
- 4) Использование эффективных алгоритмов оптимизации частотного распределения для двух режимов работы преобразователя частоты. Количество шагов для получения результата фиксировано;
- 5) Графическое представление результатов оптимизации на номограмме комбинационных частот в виде области фильтрации, а также графиках абсолютного частотного распределения в виде номиналов и диапазонов частот;
- 6) Получение уровней подавления комбинационных составляющих с использованием эмпирического подхода на основе одноточечной модели. Такая модель обеспечивает достаточно высокую точность, поскольку базируется на результатах измерений параметров конкретного преобразователя частоты в реальных условиях эксплуатации.

Интерфейс программы состоит из четырех окон:

- 1) "Converter settings" – окно настройки параметров преобразователя; позволяет выбрать одну из 2 моделей преобразователей частоты, настроить балансность, тип нелинейности, входные и выходные частоты, а так же наложить ограничения на соотношение смешиваемых частот q и/или на диапазон области фильтрации;
- 2) "Combination frequencies levels" – окно настройки уровней комбинационных составляющих с использованием эмпирического подхода на основе одноточечной модели. Такая модель обеспечивает достаточно высокую точность, поскольку базируется на результатах измерений параметров конкретного преобразователя частоты в реальных условиях эксплуатации;
- 3) "Nomogram of combination frequencies" – окно построения номограммы комбинационных частот; служит для интерактивного ввода пользователем соотношения смешиваемых частот q , а так же графического представления результатов оптимизации в виде области фильтрации.

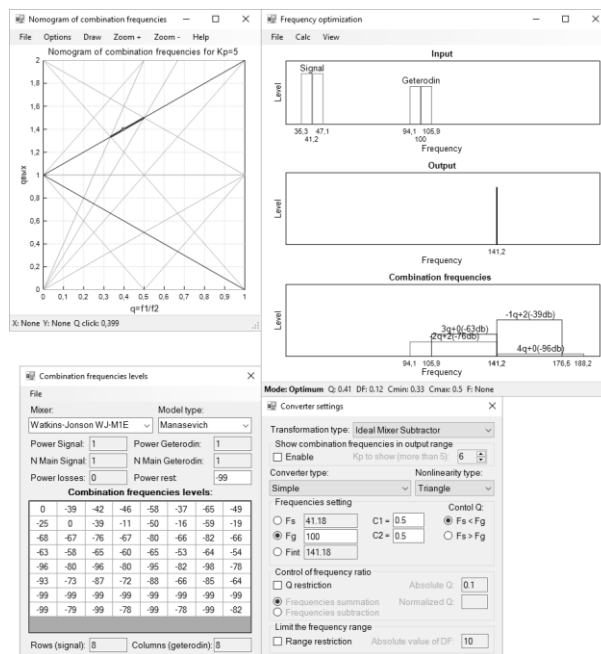


Рис. 3. Результаты моделирования идеального вычитателя диапазонов для области сложения частот модели при $F_C < F_T$, $q = 0,4$ и $F_g = 100$

- 4) "Frequency optimization" – окно построения диаграмм частотного распределения в абсолютных значениях на графиках частотного распределения входных и

выходных сигналов, а так же графике комбинационных составляющих, наиболее близких к полосе выходного фильтра.

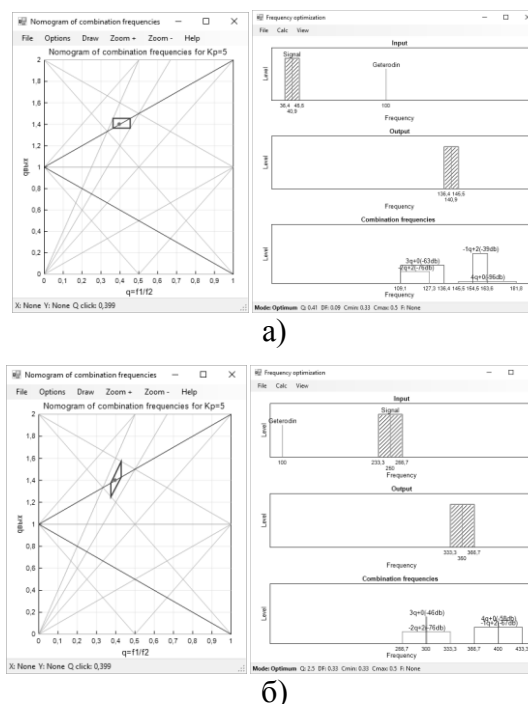


Рис. 4. Результаты моделирования преобразователя-переносчика диапазонов для области сложения частот модели при $q = 0,4$, $F_g = 100$ для двух случаев: а) $F_C < F_T$, и б) $F_C > F_T$

На рис. 4 приведены результаты моделирования преобразователя-переносчика диапазонов при тех же начальных значениях для двух случаев: при $F_C < F_T$ (рис. 4, а) область фильтрации имеет форму прямоугольника, а в случае $F_C > F_T$ (рис. 4, б) область фильтрации представляет собой четырехугольник.

Разработанное программное обеспечение FDM v3.0 предназначено для решения задачи расчета и оптимизации частотного распределения при нелинейном преобразовании частот, что позволяет прогнозировать поведение комбинационных составляющих при нелинейном преобразовании частот любого наперед заданного порядка. Используемые методы и алгоритмы являются в основной массе безитерационными, что позволяет адаптировать созданное программное обеспечение для решения задачи прогноза уровня помех нелинейного преобразования и использования этой информации для управления каналами связи в когнитивном радио.

Список литературы:

- [1] Лобенштейн. Номограмма для расчета значений комбинационных частот // Электроника, 1973. – Т. 46, № 16.
- [2] Сараев С.М. Расчет устройств преобразования частот из условий ослабления преселектором побочных каналов заданного типа / Радиотехника.- 1983.- т.38.- № 3.- С.87-90.
- [3] Манассевич В. Синтезаторы частоты (теория и проектирование): пер. с англ. / Под ред. А.С. Галина. – М.: Связь, 1979. – 384 с.
- [4] Шарапов Ю.И., Крылов Г.М., Пантелеев Ю.П. Преобразование сигнала без комбинационных частот.- М.: ИПРЖР: 2001. – 288 с.
- [5] Логинов В.И. Номограмма комбинационных частот – алгоритмический подход с учетом преобразования на гармониках сигнала и гетеродина. - ж. Радиотехника, № 4, 2011, С. 61-66.
- [6] Логинов В.И. Модели и безитерационный метод оптимизации параметров нелинейного преобразования частоты в “ближней” зоне. Ж. "Радиотехнические и телекоммуникационные системы", 2015, №1, С. 57-69.

FREQUENCY DISTRIBUTION DESIGN IN MIXER

Dementjev S.A, Loginov V.I.

Keywords: frequency distribution, mixer, Farey series

This paper describes the algorithms and optimization frequency distribution with use two basic models of mixer. Examples of the calculation and optimization of frequency distribution and their comparison with existing methods