

ПОГРЕШНОСТИ ЛИНЕАРИЗАЦИИ ХАРАКТЕРИСТИК УСИЛИТЕЛЕЙ

© 2016 г. Д.А. КОПСЯЕВ, Л.В. СПИРИДОНОВ, А.А. ФИЛИППОВ,
Н.А. МИТРОШИН, В.А. ШМЕЛЕВ

Московский технологический университет (МИРЭА)

В СВЧ-передатчиках систем связи применяют мощные усилительные каскады, в которых используются транзисторных усилители мощности, обладающие нелинейностью передаточных амплитудной характеристики (АХ) и неравномерностью фазоамплитудной характеристики (ФАХ). Нелинейность АХ проявляется в нелинейном АМ/АМ-преобразовании входного сигнала, а неравномерность ФАХ – в паразитном преобразовании амплитудной модуляции в фазовую в виде АМ/ФМ-преобразования или, так называемой, амплитудно-фазовой конверсии (АФК). Для упрощения исследований устройства с нелинейностью АХ и неравномерностью ФАХ называют устройствами с комплексной нелинейностью (УКН). Очень удобным и простым методом анализа является метод раздельного анализа нелинейности АХ и неравномерности ФАХ.

Оценка влияния нелинейности АХ. При оценке нелинейности передаточной характеристики на формирование колебаний на выходе исследуемого усилителя учитывается влияние только нелинейности АМ/АМ-преобразования, пренебрегая влиянием фазоамплитудной характеристики.

В суммарном методе АХ по напряжению нелинейного СВЧ-устройства аппроксимируют с помощью степенного полинома n -ой степени нечетного порядка:

$$u_{\text{вых}} = a_1 u_{\text{вх}} + a_3 u_{\text{вх}}^3 + a_5 u_{\text{вх}}^5 + \dots + a_n u_{\text{вх}}^n, \quad (1)$$

где a_1, a_3, \dots, a_n – постоянные коэффициенты, n – наибольший показатель степени.

Амплитуды полезных сигналов на выходе нелинейного СВЧ-устройства

$$U_{\text{вых.0}} = \sqrt{\frac{2P_{\text{вх}}}{N}} \left[a_1 + A_0 a_3 P_{\text{вх}} + B_0 a_5 P_{\text{вх}}^2 + C_0 a_7 P_{\text{вх}}^3 + \dots \right] \quad (2)$$

где коэффициенты:

$$A_0 = 3(1 + N/2); B_0 = 15(1 - 3N/2 - 2N^2/3); C_0 = 105(13/N + 41N^2/22 - 35N^3/24).$$

Амплитуды составляющих интермодуляционных искажений сигнала типа ИМИ-31:

$$U_{31} = \frac{3}{4} \left(\frac{2P_{\text{вх}}}{N} \right)^{3/2} \left[a_3 + B_{31} a_5 P_{\text{вх}} + C_{31} a_7 P_{\text{вх}}^2 + \dots \right] \quad (3)$$

где

$$B_{31} = 10(1 - 1,2/N); C_{31} = 105(1 - 2,8/N + 2,3/N^2).$$

Амплитуда составляющих интермодуляционных искажений типа ИМИ-32:

$$U_{32} = \frac{3}{2} \left(\frac{2P_{\text{вх}}}{N} \right)^{3/2} \left[a_3 + B_{32} a_5 P_{\text{вх}} + C_{32} a_7 P_{\text{вх}}^2 + \dots \right] \quad (4)$$

где

$$B_{32} = 10(1 - 1,5/N); C_{32} = 105(1 - 3,5/N + 3,5/N^2).$$

Амплитуды интермодуляционных искажений типа ИМИ-51:

$$U_{51} = \frac{5}{8} \left(\frac{2P_{\text{вх}}}{N} \right)^{3/2} [a_3 + C_{51} a_7 P_{\text{вх}}^2 + \dots] \quad (5)$$

где $C_{51} = 21(1 - 1,4/N)$.

Отметим, что уже при числе N сигналов на входе устройства $N > 5 - 10$ и $N > 20$ коэффициенты A , B и C изменяются очень незначительно и близки к предельному значению, которое получается при $N \rightarrow \infty$. В уравнениях (2) – (5) множитель перед квадратными скобками представляет собой коэффициент пропорциональности, определяющий интенсивность продуктов ИМИ данного типа по отношению друг к другу.

Недостаток суммарного метода состоит в том, что при существенной нелинейности АХ уменьшается точность расчетов, т. к. в выражениях, определяющих характеристические коэффициенты, присутствуют положительные и отрицательные члены, в ряде случаев близкие друг к другу по абсолютной величине.

При методе гармонического баланса передаточная АХ аппроксимируется с помощью известной функции. Амплитудная характеристика нелинейного СВЧ-устройства до режима насыщения представлена в виде линейного функции, а после – в виде линейно-падающей характеристики амплитудного ограничителя. Недостатком данного метода является громоздкость расчетов с увеличением количества сигнала на входе нелинейного устройства.

Чтобы представить передаточную характеристику СВЧ-усилителя какой-либо аналитической функцией или аппроксимировать ее степенным или тригонометрическим полиномом, нужно снимать экспериментально некоторую комплексную передаточную характеристику исследуемого устройства, а непосредственное измерение ее практически сложно и в литературе не отражено.

Оценка влияния неравномерности ФАХ. В данном случае оценивают набег фазы в устройстве и величину отношения $P_c/P_{\text{ИМИ}}$ (P_c – мощность группового сигнала, $P_{\text{ИМИ}}$ – мощность продуктов ИМИ) на его выходе в зависимости от мощности на входе. При малых уровнях мощности входного сигнала в набег фазы в зависимости от влияния неравномерности ФАХ предлагается вычислять по формуле $\varphi(t) = KP_{\text{вх}}(t)$, где K – коэффициент пропорциональности.

В работах [1-7] предлагается ФАХ аппроксимировать степенным полиномом. Как правило, при расчетах учитывается несколько первых членов ряда, обычно два:

$$\Delta\varphi(t) = aU_{\text{вх}}(t) + bU_{\text{вх}}^2(t), \quad (6)$$

где $U_{\text{вх}}(t)$ – огибающая входного сигнала; a , b – коэффициенты пропорциональности.

Нахождение составляющих ИМИ на выходе СВЧ-тракта, вызванных влиянием АФК, основано на том, что в функцию, аппроксимирующую эту характеристику, подставляют выражение для группового входного сигнала.

Значение параметров спектра на выходе СВЧ-тракта при обработке 20-сигнального ($N = 20$) режима и коэффициенте АМ/ФМ-преобразования $K_{\text{АМ/ФМ}} \ll 1$ определяется как отношение мощности одного полезного сигнала к мощности одного из продуктов ИМИ 3-го порядка.

Отношение мощности группового полезного сигнала (для $N = 10$) к мощности одного продукта ИМИ-32:

$$\frac{P_c}{P_{\text{ИМИ-32}}} \approx \left(\frac{2N}{0,152K_{\text{АМ/ФМ}}} \right)^2 \approx \frac{17342}{K_{\text{АМ/ФМ}}^2}. \quad (7)$$

Для составляющих ИМИ-31 это отношение определится как

$$\frac{P_c}{P_{\text{ИМИ-31}}} \approx \left(\frac{N}{0,152K_{\text{АМ/ФМ}}} \right)^2 \approx \frac{4351}{K_{\text{АМ/ФМ}}^2}. \quad (8)$$

При большом числе сигналов $N \rightarrow \infty$, для ИМИ-32:

$$\frac{P_c}{P_{\text{ИМИ-32}}} \approx \frac{8}{3N^2} \left(\frac{N}{0,152K_{\text{АМ/ФМ}}} \right)^2 \approx \frac{8}{3} \left(\frac{1}{0,152K_{\text{АМ/ФМ}}} \right)^2 \approx \frac{115}{K_{\text{АМ/ФМ}}^2}. \quad (9)$$

Из выражения (9) следует, что помехи АМ/ФМ-преобразования имеют существенное значение и при $K_{\text{АМ/ФМ}} > (2 - 3)$ град/дБ могут превышать уровень нелинейных помех, вызванных влиянием нелинейностью АХ. Сравнение формул (8) и (9) показывает, что мощность продуктов ИМИ-32 почти на 6 дБ больше, чем ИМИ-31.

Суммарные методы расчета мощности продуктов ИМИ на выходе приемопередающего тракта, учитывающих совместное влияние нелинейности АХ и неравномерности ФАХ, основаны на суммировании результатов расчета мощности ИМИ, вычисленных известными отдельными методиками. При этом считается, что эти два нелинейных эффекта АХ и АФК, возникающих в УКН независимы друг от друга:

$$(P_{\text{ИМИ}}/P_c)_{\text{сумм}} = (P_{\text{ИМИ}}/P_c)_{\text{АХ}} + (P_{\text{ИМИ}}/P_c)_{\text{ФАХ}}, \quad (10)$$

где $(P_{\text{ИМИ}}/P_c)$ – отношение мощности одного продукта ИМИ к мощности одного полезного сигнала; $(P_{\text{ИМИ}}/P_c)_{\text{сумм}}$ – суммарный учет влияния нелинейностей АХ и ФАХ; $(P_{\text{ИМИ}}/P_c)_{\text{АХ}}$ – отдельный учет влияния только нелинейности АХ; $(P_{\text{ИМИ}}/P_c)_{\text{ФАХ}}$ – отдельный учет влияния только неравномерности ФАХ.

Хотя данный подход и предполагает применение простых выражений, однако он может быть использован только для качественной оценки влияния комплексной нелинейности тракта, так как имеет существенные недостатки, а количественные результаты расчетов имеют приближенный характер.

Выводы

Проведен сравнительный анализ известных методов, исследования нелинейностей СВЧ-усилителей мощности. Установлено, что достаточно простыми и оптимальными для анализа параметров СВЧ-усилителей мощности являются методы, в которых используются теоретически или экспериментально полученные односигнальные передаточные АХ и ФАХ исследуемых устройств. Выявлено, что при большом числе сигналов отношение $P_c/P_{\text{ИМИ}}$, обусловленное совместным влиянием нелинейных характеристик СВЧ-усилителей, можно приближенно вычислять как сумму значений, полученных путем отдельного учета влияния нелинейности АХ и неравномерности ФАХ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Нефедов В.И., Абоелазм М.А., Шпак А.В. Монография / Под ред. В.И. Нефедова. Оптимизация параметров усилителей мощности. - М.: Энергоатомиздат, 2013. 239 с.
2. Нефедов В.И. Линейные СВЧ-усилители мощности для систем подвижной связи. - Научно-технические технологии, 2004, т. 5, № 12, с. 29-36.
3. Забалканский Э.С., Левин М.Е. Преобразование спектра в усилителях с комплексной нелинейностью. Радиотехника, 1998, № 2, с. 15-18.
4. Нефедов В.И., Касымов А.Ш. Методы ослабления фазовых преобразований в СВЧ-усилителях. DSPA '2003, 5-ая Международная конференция: Цифровая обработка сигналов и ее применение. - М.: 2003. Доклады – 2, с. 385-387.
5. Kenington P.V. Methods Linearize RF Transmitters and Power Amps. Microwaves & RF, December. 1998. p. 79-84.
6. Козлов Е.Ю., Нефедов В.И. Учет амплитудных и фазовых ошибок в схемах линеаризации характеристик усилителей для передатчиков систем сотовой связи. DSPA '2002, 4-ая Международная конференция: Цифровая обработка сигналов и ее применение. - М.: 2002. Доклады – 2, с. 346 – 349.
7. Спутниковая связь и вещание. Справочник. Под ред. Л.Я. Кантора /В.А. Бартенев, В.Л. Болотов, В.Л. Быков и др. - М.: Радио и связь. 1997. - 528 с.