Рисунок 3- Контактный метод

Это позволит с одной стороны исключить ошибки и значительно уменьшить время поиска места повреждения, а с другой стороны, позволит производить поиск места повреждения менее квалифицированным персоналом.

При дальнейшем усовершенствовании прибора возможно применение различной обработки выходных сигналов приёмников. От измерителей разности фаз (упрощённый вариант) до компьютерной обработки сигналов в совокупности с уровнями и точного вычисления точки расположения повреждения относительно измерительных штырей.

1. Ракк, М.А. Измерения в технике связи. [Электронный ресурс] : Учебники — Электрон. дан. — М. : УМЦ ЖДТ, 2008. — 312 с. — Режим доступа: <http://e.lanbook.com/book/59958>
2. «Автоматика, связь, информатика»: ежемесячный научно- популярный производственно - технический журнал, орган ОАО «РЖД».

Патруев Ф.К., Колинко А.В.

Методика исследования влияния автоматической регулировки усиления на эффективность использования мощности ретранслятора связи в режиме многостанционного доступа с частотным разделением каналов

*Академия Федеральной Службы Охраны Российской Федерации
(Россия, Орел)*

doi: 10.18411/sr-10-04-2021-33

Спутниковая связь в последние годы является одним из наиболее динамично развивающихся видов телекоммуникаций и играет уже неотъемлемую роль в жизни практически каждого человека. Это обусловлено как очевидными преимуществами спутниковой связи, так и постоянным совершенствованием спутниковых телекоммуникационных технологий. Поэтому подготовка специалистов в области спутниковых телекоммуникационных систем является одной из приоритетных задач как отдельно взятых корпораций, так и государства в целом.

Одним из важнейших элементов спутниковой связи является ретрансляция сигнала в транспондере бортового ретрансляционного комплекса (БРК), которая сопровождается необходимым усилением сигнала в усилителе мощности (УМ). Наиболее простыми и распространенными являются (РС), которые работают в режиме прямой ретрансляции и осуществляют многостанционный доступ с частотным разделением каналов (МДЧР). Это обуславливает необходимость уделить особое

внимание изучению особенностей функционирования таких РС в ходе обучения специалистов в области спутниковых телекоммуникационных систем.

Ретрансляторы связи с МДЧР характеризуются эффектом снижения мощности многостанционного сигнала, подавлением слабого сигнала сильным, возрастанием уровня интермодуляционных искажений с переходом в режим насыщения УМ.

В целях уменьшения различных нежелательных явлений в транспондерах современных космических аппаратов реализуются следующие режимы работы УМ:

- режим фиксированного усиления с диапазоном регулировки усиления K_y не менее 20 дБ;
- с автоматической регулировкой усиления (АРУ) в диапазоне выходной мощности 0 ... – 6 дБ (от насыщения).

В режиме АРУ мощности поступающих и исходящих сигналов из транспондера с учетом метода многостанционного доступа (МСД) и переизлучения тепловых шумов соотносятся следующим образом

$$\left(\sum_{i=1}^N P_{2,i} + P_{ш2} \right) K_y = \sum_{i=1}^N P_{3,i} + \sum_{j=1}^M P_{3j} + P_{ш3}, \quad (1)$$

где $\sum_{i=1}^N P_{2,i}$, $\sum_{i=1}^N P_{3,i}$ – суммы мощностей поступающих и исходящих многостанционных сигналов ретранслятора, $i = \overline{1, N}$;

$P_{ш2}$, $P_{ш3}$ – мощность тепловых шумов на входной части приемного устройства транспондера в полосе частот ΔF , которая также переизлучается на его выходе;

$\sum_{j=1}^M P_{3j}$ – сумма мощностей продуктов интермодуляционных искажений в полосе частот ΔF транспондера, возникающая при усилении многостанционного сигнала в нелинейном режиме, $j = \overline{1, M}$.

Рассматривая прохождение радиосигнала через БРК с прямой (сквозной) ретрансляцией, весь приемопередающий тракт транспондера представляется как линейный усилительный элемент, который усиливает поступающий сигнал на его вход сигнала с некоторым одинаковым коэффициентом передачи (K_y). таким образом, для сигнала i -й земной станции

$$P_{прд\ i}^{PC} = P_{прм\ i}^{PC} \cdot K_y, \quad (2)$$

где $P_{прд\ i}^{PC}$ – мощность передаваемого сигнала транспондером,

$P_{прм\ i}^{PC}$ – мощность принимаемого сигнала транспондером от i -ой земной станции.

При работе БРК в режиме АРУ рабочая точка на амплитудной характеристики (АХ) УМ (рис. 1) устанавливается посредством изменения коэффициента усиления (K_y) приемопередающего тракта. Уравнение (2) представлено в общем виде, который соответствует произвольному уровню поступающего на вход многостанционного сигнала. Учитывая вариант работы в большом динамическом диапазоне поступающих сигналов, рабочая точка при АРУ будет располагаться на линейном участке (точка 2 на рис. 1). Таким образом, обеспечивается минимально допустимый уровень (сопоставимый с тепловыми шумами) продуктов интермодуляционных искажений, которые отбирают некоторую часть мощности передаваемого сигнала.

Выражение (2) можно записать в виде:

$$\left(\sum_{i=1}^N P_{2,i} + P_{ш2} \right) K_y = \sum_{i=1}^N P_{3,i} + P_{ш3}. \quad (3)$$

Таким образом, при усилении сигнала в режиме, который близок к линейному, сохраняются пропорции относительных парциальных уровней многостанционного сигнала и шумов на входной и выходной частях транспондера

$$\frac{P_{2,i}}{\sum_{i=1}^N P_{2,i} + P_{ш2}} = \frac{P_{3,i}}{\sum_{i=1}^N P_{3,i} + P_{ш3}},$$

$$\frac{P_{ш2}}{\sum_{i=1}^N P_{2,i} + P_{ш2}} = \frac{P_{ш3}}{\sum_{i=1}^N P_{3,i} + P_{ш3}},$$
(4)

что упрощает расчет энергетики линии, но дает лишь приближенный результат.

Рисунок. 1. Нормированная относительно насыщения АХ УМ (по мощности)

Увеличить выходную мощность усилителя и в целом КПД транспондера можно, смещая рабочую точку ближе к насыщению, но данный участок ПХ является нелинейным (точка 1 на рис. 1). Поэтому находят отражение такие нелинейные эффекты как перераспределение мощности полезного многостанционного сигнала, тепловых шумов и продуктов интермодуляционных искажений, а также наблюдается эффект подавления слабого сигнала сильным, заключающийся в непропорциональном изменении относительных уровней парциальных сигналов.

Более точно оценить данные эффекты при усилении разноэнергетических входных сигналов с произвольной расстановкой частот позволяет метод гармонического анализа. Данный метод устанавливает любые соотношения уравнения (1) без учета нелинейного усиления шумов:

$$\left(\sum_{i=1}^N P_{2,i} \right) K_y = \sum_{i=1}^N P_{3,i} + \sum_{j=1}^M P_{3j}. \quad (5)$$

В предположении о сохранении пропорций уровня шумов относительно уровней входных и выходных многостанционных сигналов имеем:

$$\frac{P_{ш2}}{\sum_{i=1}^N P_{2,i}} = \frac{P_{ш3}}{\sum_{i=1}^N P_{3,i}} \quad (6)$$

и с учетом (4, 5) определяются уровни выходных сигналов транспондера в виде:

$$\frac{P_{3,i}}{\sum_{i=1}^N P_{3,i} + \sum_{j=1}^M P_{3j} + \frac{P_{ш2}}{\sum_{i=1}^N P_{2,i}} \sum_{i=1}^N P_{3,i}} P_{ВЫХ}, \quad (7)$$

где $P_{\text{вых}}$ – выходная мощность, соответствующая оптимальной рабочей точке АХ УМ транспондера.

Умножив числитель и знаменатель дроби на $\sum_{i=1}^N P_{3,i}$ и упростив выражение (7), получим:

$$P_{\text{вых}} \frac{P_{3,i}}{\sum_{i=1}^N P_{3,i}} / \left(1 + \frac{\sum_{j=1}^M P_{3j}}{\sum_{i=1}^N P_{3,i}} + \frac{P_{\text{ш2}}}{\sum_{i=1}^N P_{2,i}} \right) \quad (8)$$

Данное выражение удобно тем, что его составляющие имеют четкий физический смысл и легко вычислимы при известной АХ усилителя и уровнях входных сигналов транспондера.

Уровень мощности сигнала i -го радиоканала на входе приемника принимающей ЗС

$$P_{4,i} = \beta_i P_{\text{вых}} \frac{P_{3,i}}{\sum_{i=1}^N P_{3,i}} / \left(1 + \frac{\sum_{j=1}^M P_{3j}}{\sum_{i=1}^N P_{3,i}} + \frac{P_{\text{ш2}}}{\sum_{i=1}^N P_{2,i}} \right). \quad (9)$$

Мощность помех нелинейности на входе приемника принимающей ЗС в полосе сигнала i -го радиоканала

$$P_{\text{н4},i} = \beta_i P_{\text{вых}} \frac{\sum_{j=1}^m P_{\text{н3}j}(\Delta f_i)}{\sum_{i=1}^N P_{3,i} + \sum_{j=1}^M P_{\text{н3}j} + P_{\text{ш3}}}. \quad (10)$$

Для изучения влияния АРУ на эффективность использования мощности РС целесообразно использовать метод математического моделирования, потому что инструментальное исследование в данных обстоятельствах не может быть реализуемо. Поэтому был выбран вариант моделирования прохождения сигнала через УМ посредством программного среды Python.

Нелинейность передаточной характеристики УМ, представленная виде мгновенных значений, аппроксимируется полиномом 5-й степени для наилучшей точности

$$U_{\text{вых}}(t) = a_1 U_{\text{вх}} + a_3 U_{\text{вх}}^3 + a_5 U_{\text{вх}}^5. \quad (11)$$

Рассматривая прохождение n синусоидальных сигналов через УМ с произвольной амплитудой и разнесенных на некоторое расстояние по частоте, получим:

$$U_{\text{вх}}(t) = \sum_{i=1}^n U_i \sin \omega_i t, \quad (12)$$

В соответствии с выражениями (1), (2), (3) получаем значения уровней выходных сигналов на гармониках входных, и уровней гармонических составляющих, которые образуются комбинациями входных сигналов.

В качестве примера на условную модель передаточной характеристики (ПХ) мгновенных значений подадим два гармонических синусоидальных сигнала с небольшой амплитудой (0,15 дБ относительно входного напряжения насыщения УМ) и условными частотами (20 и 40 Гц). Для моделирования линейного режима выбираем рабочую точку 0,5 дБ. В результате на спектре выходного сигнала наблюдается появление побочных составляющих спектра, но усиление сигнала происходит в пределах заданных требований (рис. 2).

Рисунок 2. Графики ПХ мгновенных значений УМ (по напряжению); мощностей входного и выходного сигналов; спектров входного и выходного сигналов в двухсигнальном линейном режиме

Рассматривая прохождение тех же двух синусоидальных сигналов через усилитель мощности в режиме насыщения (рабочая точка 1.4 дБ), можно наблюдать графики, представленные на рис. 3. В результате преобразования в нелинейном режиме наблюдается сильное ослабление сигнала и искажение его формы.

Рисунок 3. Графики ПХ мгновенных значений УМ (по напряжению); мощностей входного и выходного сигналов; спектров входного и выходного сигналов в двухсигнальном режиме насыщения

В режиме АРУ обеспечивается прохождение двух синусоидальных сигналов через усилитель мощности при минимально допустимом уровне интермодуляционных продуктов преобразований, и, как следствие, выходная мощность РС расходуется с большим кпд. Наибольший коэффициент усиления сигнала достигается в пиковой точке режима насыщения, но из-за сильного влияния интермодуляционных искажений посредством АРУ рабочая точка сдвигается на линейный участок таким образом, чтобы входящий многостанционный сигнал полностью попадал на линейную часть ПХ УМ (рис. 4). Условно линейный режим выбран в пределах от 0 до 0,75 дБ.

Таким образом, рабочую точку для усиления многостанционного сигнала можно рассчитать по формуле:

$$PT = 0,75 - U_{\Sigma}, \quad (13)$$

где U_{Σ} – амплитуда суммарного многостанционного сигнала на входе УМ.

При сложении двух гармонических сигналов

$$U_{\Sigma} = \sqrt{U_1^2 + U_2^2 + 2U_1U_2 \cos|\omega_1 - \omega_2|t}. \quad (14)$$

Рисунок 4. Графики ПХ мгновенных значений УМ (по напряжению); мощностей входного и выходного сигналов; спектров входного и выходного сигналов в двухсигнальном режиме АРУ

Аналогично рассматривая прохождение четырех синусоидальных сигналов через УМ в режиме АРУ, наблюдаем большее смещение рабочей точки, вызванной большей амплитудой входного результирующего многосигнального сигнала (рис. 5).

Рисунок 5. Графики ПХ мгновенных значений УМ (по напряжению); мощностей входного и выходного сигналов; спектров входного и выходного сигналов в четырехсигнальном режиме АРУ

Таким образом в работе демонстрируется методика исследования влияния АРУ на эффективность использования мощности РС в режиме МДЧР посредством разработанной имитационной модели УМ РС. Представленная методика позволяет более глубоко и наглядно изучить принципы и роль АРУ в РС при обучении специалистов в области спутниковых телекоммуникационных систем.

1. Основы энергетического расчета радиорелейных и спутниковых систем передачи: учебно-методическое пособие / [А.В. Колинко, А.И. Ширко, Б.Г. Катугин, А.А. Корнилов] – Орёл: Академия ФСО России, 2020. – 190 с.
2. Основы построения радиорелейных и спутниковых систем передачи: учебное пособие / А. И. Ширко [и др.]. – Орёл: Академия ФСО России, 2015. – 328 с.
3. Основы энергетического расчета линий многоканальной радиосвязи: пособие по курсовому и дипломному проектированию / А.А. Илюхин, А.В. Колинко, В.М. Терентьев, И.А. Чаплыгин; под ред. А.В. Колинко. - Орел: Академия ФСО, 2007, 208 с.
4. Бортовой ретрансляционный комплекс (БРК) спутника связи. Принципы работы, построение, параметры / Орлов А.Г., Севастьянов Н.Н., науч. ред. В.Н. Бранец. – Томск: Издательский Дом Томского государственного университета, 2014. – 208 с.