

**ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТЬ КАБЕЛЬНЫХ МОДЕМОВ
С АНАЛОГОВО-ЦИФРОВОЙ КОРРЕКЦИЕЙ ИСКАЖЕНИЙ КАНАЛА**

**NOISE IMMUNITY OF CFBLE DRIVER MODEM WITH
ANALOG-DIGITAL CORRECTION OF CHANAL DISTORTION**

Аннотация. В данной статье анализируется вклад шумов кабеля и шумов квантования в отношение сигнал/шум после коррекции искажений канала связи.

Summary. Contribution cable noise and quantization noise in signal to noise rate are estimating after cable distortion correction in this article.

В настоящее время осуществляется модернизация аналоговых систем передачи (АСП) путем цифровизации их высокоскоростными модемами (ВМ) [1]. Тракты проводных АСП характеризуются значительным затуханием сигнала на высоких частотах своего рабочего диапазона [2], что ставит определенные требования к системам связи работающих на этих трактах. В настоящее время получили широкое развитие цифровые ВМ. Цифровые методы позволяют выполнить более точную коррекцию искажений канала, что дает возможность увеличить пропускную способность оцифрованного тракта. Разные методы коррекции позволяют получить различную степень защищенности сигнала от шумов. При коррекции сигнала со значительным перекосом частотной характеристики существенный вклад вносят шумы квантования. Увеличение числа разрядов аналогово-цифровых преобразователей АЦП не всегда возможно реализовать на практике. **Возникает проблема** нахождения методов коррекции, позволяющих повысить защищенность сигнала от шумов.

Из **анализа исследований**, посвященных шумам АСП, работающих по медному кабелю [3] видно, что влияния шумов на АСП хорошо изучены, описаны и экспериментально измерены, также хорошо изучены применяемые в АСП аналоговые корректоры, изучены шумы АЦП и шумы цифровых корректоров [4], но не описана комбинация цифровой и аналоговой коррекции искажений АСП. Эта комбинация позволяет увеличить защищенность сигнала от шума. Поэтому **цель** данной статьи – показать возможность повышения защищенности сигнала от шумов АСП с аналогово-цифровой коррекцией искажений канала.

Затухание медного кабеля существенно увеличивается с увеличением частоты. Так как собственные шумы кабеля ниже шумов квантования, то на высоких частотах вклад шумов квантования, в суммарный шум, становится существенным. Используя предварительную аналоговую коррекцию можно снизить влияние шумов квантования. Выигрыш этого зависит от многих факторов, таких как разрядность АЦП, уровня собственных шумов линейного тракта, АЧХ кабеля, уровня передаваемого сигнала, полосы занимаемых частот и т.д.

Для примера рассмотрим ВМ для передачи двух потоков Е1 [5], работающий в полосе 10-600 кГц по линейному тракту системы К-60П. Абсолютный уровень сигнала по мощности на выходе ВМ равен $P_{пер} = 20$ дБм. Спектр сигнала распределен равномерно в рабочей полосе частот. Сравним различные способы коррекции искажений АСП и **найдем способ**, дающий наибольшую защищенность сигнала от шумов.

Уровень спектральной плотности средней мощности сигнала на выходе модема $W_{пер}$ распределенного в полосе 10 кГц – 600 кГц, можно определить как:

$$W_{пер} = 10 \times \log\left(\frac{P_{пер}}{\Delta F}\right) - 10 \times \log\left(\frac{1 \text{ мВт}}{1 \text{ Гц}}\right) = -37,7 \text{ дБ}, \quad (1)$$

где $P_{пер}$ – мощность сигнала на выходе передатчика, [мВт];

ΔF – полоса частот, в которой сосредоточен сигнал модема, [Гц].

Пройдя через линейный тракт, в котором отсутствуют амплитудно-частотные корректоры, распределение уровня спектральной плотности сигнала по частоте на входе модема будет иметь вид, показанный на рис. 1. На этом же рисунке показано распределение уровня спектральной плотности собственного шума кабеля.

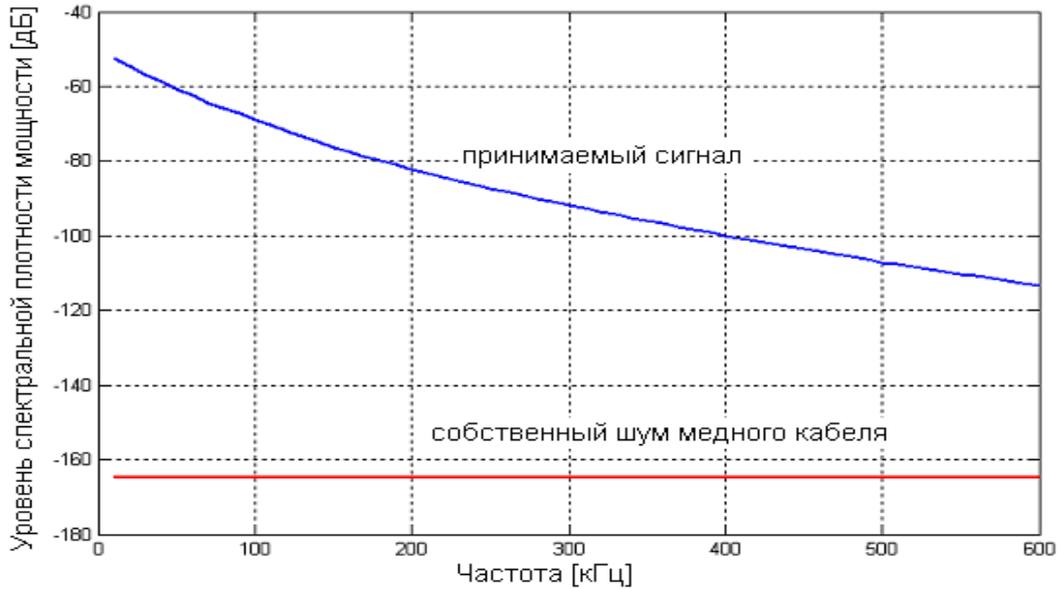


Рисунок 1 – Частотное распределение уровней спектральных плотностей мощности шума и сигнала на приемном конце кабеля

Мощность собственного шума кабеля составляет $P_{ш} = -130$ дБм в полосе $\Delta F_{ш} = 3,1$ кГц², этот шум равномерно распределен в рабочей полосе частот, поэтому уровень спектральной плотности мощности собственного шума $W_{ш}$ составит:

$$W_{ш} = 10 \times \log\left(\frac{P_{ш}}{\Delta F_{ш}}\right) - 10 \times \log\left(\frac{1 \text{ мВт}}{1 \text{ Гц}}\right) = -164,9 \text{ дБ}. \quad (2)$$

Для обработки аналогового сигнала необходимо преобразовать его в цифровой вид. Для этого будем использовать АЦП с частотой дискретизации в четыре раза выше верхней частоты сигнала, это позволяет аппаратно выполнить фильтр предварительной фильтрации, искажениями которого можно пренебречь (искажения вносимые фильтром значительно меньше искажений вносимых АСП).

Рассмотрим структуру включения ВМ «точка-точка» (на одном усилительном участке АСП) представленную на рис. 2:

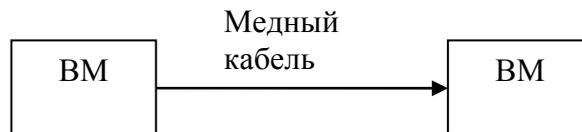


Рисунок 2 - Структура цифровизованных АСП

Уровень спектральной плотности мощности шума АЦП в полосе 10 кГц-600 кГц можно определить как:

$$W_{ш\text{АЦП}} = P_C - P_{\Delta\Pi\Pi} - 10 \times \log\left(\frac{\left(\frac{1}{2^N - 1}\right)^2}{12} \times \frac{1}{2}\right) - 10 \times \log\left(\frac{1 \text{ мВт}}{1 \text{ Гц}}\right), \quad (3)$$

где $P_{ш}$ – мощность сигнала на входе ВМ, [дБм];

$P_{\Delta ЦП}$ – пикфактор сигнала, т.е. разность уровней пиковой мощности и средней мощности сигнала на входе ВМ, [дБ], типичное значение для сигнала с КАМ модуляцией 5-7 дБ;

$$10 \times \log \left(\frac{\left(\frac{1}{2^N - 1} \right)^2}{12} \times \frac{1}{2} \right) - \text{мощность шумов квантования, равномерно распределенная в полосе}$$

принимаемого сигнала [6].

Распределения уровней спектральной плотности мощности шумов и сигнала от частоты показаны на рис. 3. Определим защищенность сигнала от шумов A_3 после коррекции сигнала цифровыми методами по формуле (4):

$$A_3 = Pc - 10 \times \lg \left(\int_{10e3}^{600e3} W_{ш_{\Delta ЦП}} df + \int_{10e3}^{600e3} W_{ш_{к}} df \right), \quad (4)$$

где $\int_{10e3}^{600e3} W_{ш_{\Delta ЦП}} df$ – мощность шумов квантования АЦП в полосе 10-600 кГц, [мВт];

$\int_{10e3}^{600e3} W_{ш_{к}} df$ – мощность собственных шумов кабеля в полосе 10-600 кГц, [мВт].

Защищенность сигнала от шумов в этом случае равно 43,88 дБ.

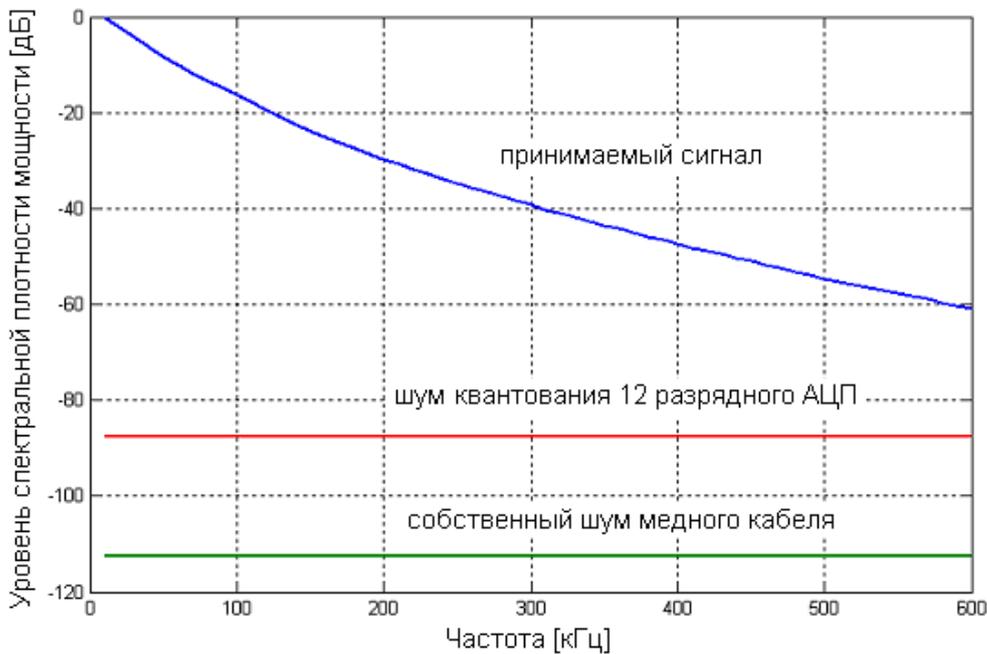


Рисунок 3 – Частотное распределение уровней спектральных плотностей мощности шума кабеля, шума АЦП и сигнала на входе ВМ

Рассмотрим структуру включения ВМ, использующую предварительную аналоговую коррекцию, представленную на рис. 4:



Рисунок 4 - Структура цифровизованных АЦП с предварительной аналоговой коррекцией

Аналоговый корректор выравнивает затухание частотной характеристики сигнала на высоких частотах, при этом на высоких частотах усиливаются шумы. Уровень спектральной плотности мощности шума АЦП в полосе 10 кГц – 600 кГц вычислим, пользуясь формулой (3). Распределение уровней спектральной плотности мощностей сигнала и шума, после коррекции и оцифровки сигнала примут вид показанный на рис. 5.

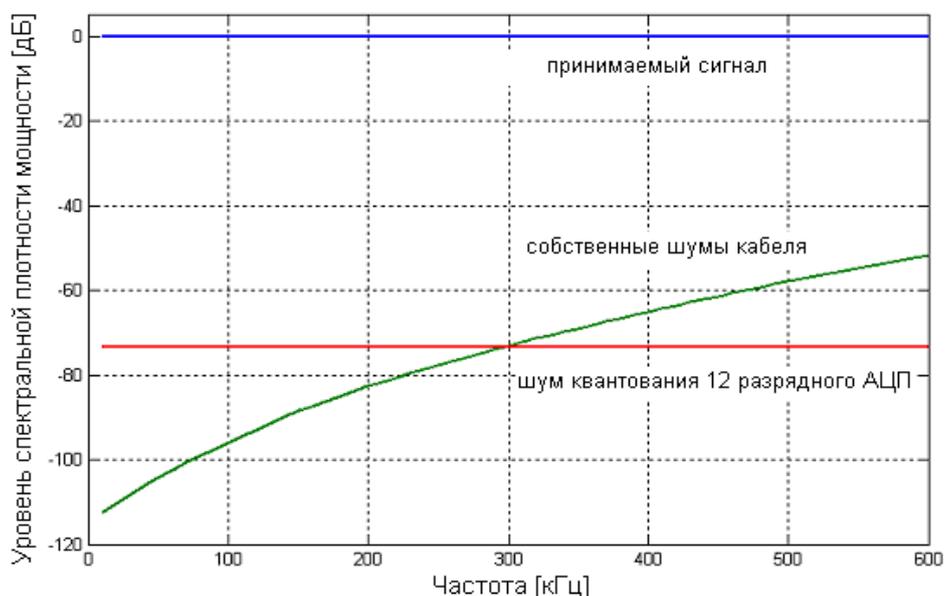


Рисунок 5 – Частотное распределение уровней спектральных плотностей мощности шума кабеля, шума АЦП и сигнала с применением предварительной аналоговой коррекции

Пользуясь формулой (4), рассчитаем защищенность сигнала от шумов после применения аналогового корректора, оно равно 60,98 дБ.

В табл. 1 приведена защищенность сигнала от суммарных шумов без применения аналогового корректора и с использованием аналогового корректора в зависимости от различной разрядности АЦП.

Таблица 1 – Защищенность сигнала от шумов после коррекции искажений канала

Разрядность АЦП, бит	Защищенность сигнала от шумов при цифровой коррекции, дБ	Защищенность сигнала от шумов при цифровой коррекции с предварительной аналоговой коррекцией, дБ
11	37,92	60,85
12	43,88	60,98
13	49,66	61,01
14	54,82	61,02
15	58,47	61,02
16	60,23	61,02

По результатам проведенных исследований можно сделать **вывод**, что для уменьшения вклада шумов квантования, при цифровизации аналоговых трактов ВМ, возможно получить не только увеличением разрядности АЦП, но и используя предварительные аналоговые корректоры. Нелинейности и ошибки преобразования современных АЦП с частотой дискретизации выше 2,4 МГц (такая частота необходима для цифровизации сигнала с полосой 600 кГц) позволяют получить до 14 эффективных разрядов, в этом случае, применяя аналоговую предварительную коррекцию, возможно повысить помехозащищенность до 6,2 дБ. Аналоговая предварительная коррекция позволяет эффективно использовать более дешевые 12-разрядные АЦП. При этом в ВМ аналоговые корректоры грубо выравнивают большие затухания медного кабеля, а цифровые корректоры выполняют точную коррекцию сигнала.

Литература

1. www.ukrtelecom.com
2. *Брескин В.А.* Модемный метод модернизации линий передачи металлического кабеля первичной сети // Наукові праці ОНАЗ ім. О.С. Попова. – 2003. – Одесса. – № 2.
3. *Многоканальная электросвязь и РРЛ/ Н.Н. Баева, И.К. Бобровская, В.А. Брескин, Е.Л. Федорова:* Учебник для вузов связи. – М.: Радио и связь, 1984.
4. *Уидроу Б., Стирнз С.* Адаптивная обработка сигналов: Пер. с англ. – М.: Радио и связь, 1989.
5. http://www.ati.tm.odessa.ua/prod_html/k60d_mod.html
6. *Баскаков С.И.* Радиотехнические цепи и сигналы: Учебник для вузов по спец. «Радиотехника». 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Высшая школа, 1988.