

УДК 621.396

Э.Ф. Бабуров, профессор, д-р техн. наук,

В.К. Маригодов, профессор, д-р техн. наук

Севастопольский национальный технический университет

Ул. Университетская 33, г. Севастополь, Украина, 99053

E-mail: root@sevtu.sebastopol.ua

ВОЗМОЖНОСТИ МЕТОДА ПРЕДЫСКАЖЕНИЯ СИГНАЛОВ

Рассмотрены особенности метода предварительного искажения сигналов, применяемого для повышения помехоустойчивости систем передачи информации. Проанализированы возможности метода, показана его эффективность в борьбе с аддитивными и мультипликативными помехами, а также при наличии межсимвольных и перекрестных помех.

Ключевые слова: *предыскажение и корректирование сигналов, помехоустойчивость систем передачи информации.*

Постановка проблемы в общем виде

Искажения сигнала, возникающие на выходе нескорректированного канала связи, следует отличать от искажений, вызванных действием помех различного происхождения. Коррекцию канала целесообразно осуществлять на передающей стороне. При этом сигнал претерпевает обработку в виде предварительного искажения.

Метод предварительного искажения (предыскажения) передаваемых и корректирования принимаемых сигналов (ППС и КПС), используют также для повышения помехоустойчивости систем передачи информации. Реализация метода осуществляется путем применения на передаче и приеме предыскажающего и корректирующего устройств соответственно.

Метод эффективен при наличии в канале как аддитивных, так и мультипликативных помех, позволяет бороться с межсимвольными и перекрестными помехами. Немаловажным преимуществом метода является сравнительная простота применяемых предыскажающих и корректирующих устройств.

Наряду с указанными достоинствами все известные системы ППС и КПС обладают одним серьезным недостатком. Повышение помехоустойчивости систем методом предыскажения обеспечивается только для сигналов, на спектральную плотность мощности которых рассчитаны предыскажающее и корректирующее устройства. Эффективность предыскажения сигналов, имеющих другие спектральные плотности, не может быть максимальной при тех же предыскажающих и корректирующих устройствах без их перенастройки. В условиях быстрой смены передаваемых сигналов с отличающимися спектральными плотностями перенастройка или изменение структуры устройств может быть только автоматической, образуя, таким образом, систему адаптивного предыскажения передаваемых сигналов. При этом возникает необходимость разработки критерия, при помощи которого можно было бы оценить эффективность адаптивного предыскажения.

Анализ последних исследований и публикаций

Достигнутые успехи в области повышения помехоустойчивости систем передачи информации методом ППС и КПС достаточно полно освещены в литературе, например в монографиях [1, 2]. Благодаря универсальности метода, как уже упоминалось, он может быть использован для решения широкого круга задач. Однако до сих пор не определены критерии эффективности метода в каждом конкретном случае.

Постановка задачи

С целью уяснения разнообразия применимости метода и наиболее эффективного его использования необходимо выполнить классификацию существующих критериев его эффективности в условиях действия разнообразных помех и определить разработку новых критериев для адаптивных систем предыскажения и корректирования сигналов.

Изложение основного материала

Для оценки эффективности ППС с целью повышения помехоустойчивости систем передачи информации, нашли применение три критерия: энергетический критерий, критерий наименьшей среднеквадратической ошибки и критерий отношения вероятностей [1,2,3].

В зависимости от используемого критерия реализация ППС и КПС приобретает свои особенности.

Энергетический критерий показывает во сколько раз увеличивается по мощности отношение сигнал–помеха на выходе канала связи благодаря введению предыскажения и корректирования сигналов. Если обозначить отношение сигнал–помеха по мощности на входе приемника при наличии

предыскажения через $\frac{P'_C}{P'_\Pi}$, а отношение сигнал–помеха в той же точке канала без предыскажения как $\frac{P_C}{P_\Pi}$, то эффективность предыскажения будет

$$S = \frac{\frac{P'_C}{P'_\Pi}}{\frac{P_C}{P_\Pi}} = \frac{P'_C P_\Pi}{P_C P'_\Pi}. \quad (1)$$

Определив мощности сигнала и помехи через их спектральные плотности мощности $G(\omega)$ и $N(\omega)$ соответственно, учитывая спектральную функцию чувствительности получателя сообщений $W(\omega)$, которая отражает и особенности восприятия им помех, выражение эффективности предыскажения согласно (1) принимает вид [3]

$$S = \frac{\int_{\omega_1}^{\omega_2} G(\omega) d\omega \int_{\omega_1}^{\omega_2} N(\omega) W(\omega) d\omega}{\int_{\omega_1}^{\omega_2} G(\omega) |K_1(\omega)|^2 d\omega \int_{\omega_1}^{\omega_2} \frac{N(\omega) W(\omega)}{|K_1(\omega)|^2} d\omega}, \quad (2)$$

где $|K_1(\omega)|^2$ – квадрат модуля АЧХ предыскажающего устройства, ω_1, ω_2 – граничные частоты эффективной полосы пропускания канала.

Формула (2) получена при условии взаимнообратности передаточных функций, т.е. $K_1(\omega)K_2(\omega) = k$.

Максимум функционал (2) достигает при определенной (оптимальной) функции $|K_1(\omega)|^2_{opt}$, в этом случае

$$S_{max} = \frac{\int_{\omega_1}^{\omega_2} G(\omega) d\omega \int_{\omega_1}^{\omega_2} N(\omega) W(\omega) d\omega}{\left(\int_{\omega_1}^{\omega_2} \sqrt{G(\omega) N(\omega) W(\omega)} d\omega \right)^2}. \quad (3)$$

Эффективность предыскажения в соответствии с (3) тем больше, чем сильнее отличие спектральных плотностей мощности сигнала $G(\omega)$ и взвешенной помехи $N(\omega)W(\omega)$. При выполнении равенства $G(\omega) = N(\omega)W(\omega)$ в соответствии с (3) получаем $S_{max} = 1$, т.е. предыскажение не эффективно.

Критерий наименьшей среднеквадратической ошибки характеризует отклонение принятого сигнала $\xi'(t)$ от переданного $\xi(t)$.

Представляет интерес определить минимум среднеквадратической ошибки при наличии в канале помех и применении ППС и КПС. Для эргодических процессов $\xi(t)$ и $\xi'(t)$ нахождение минимума среднеквадратической ошибки может быть заменено нахождением минимума дисперсии

$$\varepsilon^2 = D[\xi(t) - \xi'(t)]. \quad (4)$$

Используя спектральные и взаимные спектральные плотности процессов $\xi(t)$ и $\xi'(t)$, рассматривая совокупность сигналов как гильбертово пространство векторов и находя минимум дисперсии (4) получено выражение [4]

$$\varepsilon^2 = \int_{\omega_1}^{\omega_2} \frac{G(\omega) N(\omega) W(\omega)}{|K_1(\omega)|^2 G(\omega) + N(\omega) W(\omega)} d\omega. \quad (5)$$

Формула (5) отвечает произвольному выбору передаточных функций предыскажающего и корректирующего устройств $K_1(\omega)$ и $K_2(\omega)$ в отличие от выражения (3), полученного при взаимнообратных $K_1(\omega)$ и $K_2(\omega)$.

Представляет интерес определить оптимальную АЧХ предсказывающего устройства $|K_1(\omega)|^2$ при условии неизменной мощности излучаемого сигнала

$$\frac{1}{2\pi} \int_{\omega_1}^{\omega_2} G(\omega) |K_1(\omega)|^2 d\omega = P_{CP} = Const. \quad (6)$$

Вариация функционала (5) при дополнительном ограничении (6) приводит к результату

$$\begin{cases} |K_1(\omega)|_{opt}^2 = \sqrt{\frac{N(\omega)W(\omega)}{\lambda G(\omega)}} - \frac{N(\omega)W(\omega)}{G(\omega)}, & \text{при } \frac{G(\omega)}{\lambda N(\omega)W(\omega)} \geq 1; \\ |K_1(\omega)|_{opt}^2 = 0 & \text{при } \frac{G(\omega)}{\lambda N(\omega)W(\omega)} < 1, \end{cases} \quad (7)$$

где λ — параметр, который при известном значении средней взвешенной мощности помехи

$P_{II} = \frac{1}{2\pi} \int_{\omega_1}^{\omega_2} N(\omega)W(\omega) d\omega$ представляется формулой

$$\lambda = \left(\frac{\int_{\omega_1}^{\omega_2} \sqrt{G(\omega)N(\omega)} d\omega}{P_{CP} + P_{II}} \right). \quad (8)$$

Отметим, что в отличие от энергетического, критерий наименьшей среднеквадратической ошибки позволяет получить предсказывающее устройство, которое в соответствии с (7) и (8) пропускает не все спектральные составляющие передаваемого сигнала, а только те, для которых отношение спектральной плотности сигнала на входе канала связи к спектральной плотности взвешенной помехи больше некоторого порогового значения.

Таким образом, предсказывающее устройство, реализованное в соответствии с критерием наименьшей среднеквадратической ошибки, вносит в канал ошибку, которую нельзя устранить. Тем не менее, результирующая ошибка, обусловленная как действием помех в канале, так и вносимая предсказателем, оказывается меньше чем в случае отсутствия ППС и КПС.

Критерий отношения вероятностей представляет собой величину уменьшения вероятности ошибки принимаемого сигнала в результате ППС

$$\gamma = \frac{P}{P'}, \quad (9)$$

где P' — вероятность ошибки в случае наличия предсказания, P — вероятность ошибки приема сигнала той же системой, но без применения предсказаний. При оптимальном предсказании сигналов вероятность ошибки (9) принимает минимальное значение. В этом случае критерий эффективности следует записать в виде

$$\gamma_{OPT} = \frac{P}{P'_{min}}. \quad (10)$$

Вероятность ошибки, в свою очередь, является функцией

$$P = \psi(h), \quad (11)$$

где $h^2 = \frac{P_C T}{N(\omega)}$ — отношение средней энергии принимаемого сигнала $P_C T$ к спектральной плотности мощности помехи $N(\omega)$. От критерия отношения вероятностей (10) с учетом (11) можно перейти к

энергетическому критерию, если учесть что $S_{max} = \left[\frac{(h')^2}{h^2} \right]^2$.

Предсказание сигналов при воздействии на канал различного характера помех

Следует отметить, что метод предсказания передаваемых и корректирования принимаемых сигналов является эффективным как при воздействии на канал связи аддитивных помех, так и при

наличии в канале мультипликативной помехи. Кроме того, метод ППС и КПС находит применение для существенного ослабления межсимвольных, переходных и нелинейных помех от соседних каналов.

Эффективность предсказаний при наличии аддитивной помехи можем найти исходя из понятия скорости передачи информации по определению К.Е. Шеннона

$$R = \frac{1}{2\pi} \int_{\omega_1}^{\omega_2} \log\left(1 - \frac{G(\omega)}{N(\omega)}\right) d\omega. \quad (12)$$

Аддитивная помеха может иметь равномерную спектральную плотность мощности в эффективной полосе канала $\Delta\omega = \omega_2 - \omega_1$, или спектральную плотность, отличающуюся от равномерной, например, треугольную или квадратичную.

Как уже было отмечено, при наличии аддитивной помехи эффективность предсказания определяют в соответствии с одним из критериев: энергетическим, наименьшей среднеквадратической ошибки, критерием отношения вероятностей. Каждый из критериев налагает определенные условия на реализацию предсказывающего и корректирующего устройств.

При условии постоянства мощности источника шума

$$\frac{1}{2\pi} \int_{\omega_1}^{\omega_2} N(\omega) d\omega = P_{\Pi} = \text{Const}, \quad (13)$$

и определенной спектральной плотности мощности сигнала $G(\omega)$ находим минимум функционала (12) варьируя спектральной плотностью гауссова шума $N(\omega)$. Таким образом, определяем при каком $N(\omega)$ скорость передачи наименьшая. Оказывается, что помеха типа «белый шум» является наихудшей, если мощность источника помех (13) ограничена. При снятии ограничения (13), т.е. при большом уровне помех наихудшая спектральная плотность $N(\omega)$ та, которая некоторым образом коррелирована со спектральной плотностью полезного сигнала $G(\omega)$ [1].

Предсказание передаваемых сигналов при наличии мультипликативной помехи в канале имеет свои особенности. Практически наряду с мультипликативной в реальных каналах связи почти всегда имеет место аддитивная помеха. В этом случае сигнал на выходе канала

$$\eta'(t) = \sum_k \eta(t - \tau_k) v_k + n(t), \quad (14)$$

где v_k – параметр замирания для каждого из k лучей, $n(t)$ – аддитивная помеха в канале, τ_k – запаздывание сигнала каждого из k лучей.

Исходя из (14) для однолучевого канала имеет место зависимость

$$\eta'(t) = \eta(t) v + n(t), \quad (15)$$

где v – не зависящая от времени случайная величина, распределение которой совпадает с одномерным распределением реального замирания. Выражение (15) отражает действительность в случае, если τ_k имеет малый разброс в сравнении с постоянной времени, определяемой эффективной шириной полосы пропускания канала, а также при условии независимости процесса $v_k(t)$ от процессов $\eta(t)$ и $n(t)$, и при ничтожно малой частоте процесса $v_k(t)$ в сравнении с нижней частотой передаваемого сигнала.

Наличие мультипликативной помехи приводит к изменению огибающей и фазы принимаемого сигнала $\eta'(t)$. При этом закон распределения флуктуаций огибающей является релеевским или обобщенным релеевским. Заметим, что при воздействии только мультипликативной помехи в случае фиксированной средней мощности на входе канала связи энергетический критерий эффективности ППС теряет смысл.

Уменьшение переходных и нелинейных помех от соседних каналов методом предсказания сигналов достигается благодаря ослаблению энергии несущей частоты, в результате чего увеличивается глубина модуляции сигнала, а соответственно и его помехоустойчивость. Ослабление переходных и флуктуационных помех в канале связи, измеряемое в неперах, происходит на величину

$$\Delta v = \ln \frac{2}{m + k(2 - m)}, \quad (16)$$

где m – коэффициент глубины модуляции, k – затухание, вносимое предсказывающим и корректирующим устройствами.

Средняя мощность продуктов нелинейности второго порядка в телефонном канале радиорелейной линии уменьшается благодаря ППС и КПС в 1,5 раза, а средняя мощность продуктов третьего порядка — в 3 раза при равномерной спектральной плотности мощности исходного непредыскаженного сигнала.

Для сигналов с экспоненциальной формой спектральной плотности мощности благодаря ППС и КПС в стандартной телефонной линии связи продукты нелинейности второго порядка уменьшаются до 6 раз, а продукты нелинейности третьего порядка достигают десятикратного уменьшения.

Применение метода в зависимости от вида предсказываемого сигнала

Метод ППС и КПС находит применение при обработке как аналоговых, так и дискретных сигналов. В случае предсказания аналоговых сигналов следует пользоваться критерием наименьшей среднеквадратической ошибки или энергетическим критерием. При передаче дискретных сигналов расчет эффективности предсказания удобнее всего производить исходя из критерия отношения вероятностей. Предсказание дискретных сигналов особенно целесообразно в узкополосных системах, для которых другие методы обработки сигналов, например, оптимальная или согласованная фильтрация, не дают такого выигрыша.

Универсальность метода ППС с целью повышения помехоустойчивости систем передачи информации наглядно проявляется в возможности предсказания как АМ так и ЧМ-сигналов. Отличие спектральных плотностей мощности сигнала $G(\omega)$ и помехи $N(\omega)$ позволяет повысить помехоустойчивость систем. При этом максимальная эффективность предсказания определена выражениями (3) и (5).

ППС в многоканальных системах дает, прежде всего, возможность устранить линейный перекос уровней, т.е. выровнять помехоустойчивость верхних и нижних каналов группового спектра и уменьшить межсимвольные и перекрестные помехи.

В одноканальных системах при малых индексах модуляции μ_p предсказание ЧМ-сигналов превышает по эффективности предсказание АМ-сигналов. Так при $\mu_p = 0,5$ это превышение достигает трех раз. При больших индексах модуляции $\mu_p = 5 \dots 10$ предсказание не эффективно.

Амплитудночастотное и фазочастотное предсказание сигналов

Наряду с амплитудночастотным предсказанием (АЧП) в системах передачи информации целесообразно применять фазочастотное и амплитуднофазовое предсказание (ФЧП и АФП) сигналов. При ФЧП осуществляется изменение фаз спектральных составляющих с последующим корректированием их на приеме независимо от амплитуд спектральных составляющих сигнала.

АФП означает наличие как АЧП, так и ФЧП. Так как АЧП приводит к нежелательному увеличению динамического диапазона сигналов, а переходные характеристики предсказывающих устройств иногда содержат значительные выбросы, то ожидаемое повышение помехоустойчивости не всегда может быть реализовано из-за ограниченности динамического диапазона канала и высоких требований к его переходной характеристике. ФЧП сигналов, выполненное совместно с АЧП, позволяет снизить динамический диапазон передаваемых сигналов и уменьшить выбросы переходной характеристики, сохраняя достигнутую благодаря АЧП сигналов помехоустойчивость систем. Операция ФЧП является линейной и выполняется при помощи неминимальнофазовых фильтров или дисперсионных линий задержки в зависимости от особенностей обрабатываемых сигналов. АЧХ таких устройств являются равномерными. Уменьшение динамического диапазона сигналов, передаваемых по каналам связи с аддитивной помехой, дополнительно повышает помехоустойчивость систем.

Адаптивное предсказание сигналов

В [2] рассмотрены вопросы оптимизации предсказаний при регулируемых предсказателе и корректоре, а также работа этих устройств при наличии обратной связи с выхода канала на его вход при воздействии на канал чисто мультипликативной помехи. В этих случаях, как критерий минимума среднеквадратической ошибки, так и энергетический критерий не учитывают изменений спектральных плотностей при смене сигналов. Возникающая игровая ситуация между источником сигналов и источником помех приводит к необходимости разработки теоретико-игрового критерия.

Выводы по данному исследованию

На основании выполненной классификации возможностей метода предсказания сигналов можно сделать вывод о достаточной универсальности метода. Пользуясь описанной системой критериев при действии в канале связи различного вида помех, получена возможность достижения максимально возможных результатов в повышении помехоустойчивости систем передачи информации методом ППС и КПС.

Перспективы дальнейших исследований

Интенсивное развитие систем передачи информации вызывает необходимость совершенствования метода предсказания передаваемых и корректирования принимаемых сигналов путем определения, прежде всего, эффективных критериев. Так, нуждается в дальнейшем исследовании и совершенствовании теоретико-игровой критерий, применяемый для систем адаптивного предсказания [2].

В современных высокоскоростных цифровых системах передачи информации наряду с помехоустойчивым кодированием передаваемых сигналов метод предсказания обеспечивает дополнительное повышение помехоустойчивости, используя отличие спектральных плотностей передаваемых сигналов и воздействующих помех.

Разработка эффективных критериев, учитывающих совместное применение помехоустойчивого кодирования и предсказания передаваемых сигналов, нуждается в дальнейших исследованиях.

Библиографический список

1. Маригодов В.К. Помехоустойчивая обработка информации / В.К. Маригодов. — М.: Наука, 1983. — 200 с.
2. Маригодов В.К. Синтез оптимальных радиосистем с адаптивным предсказанием и корректированием сигналов / В.К. Маригодов, Э.Ф. Бабуров. — М.: Радио и связь, 1985. — 248 с.
3. Штейн В.М. О расчете предсказывающих и корректирующих устройств / В.М. Штейн // Радиотехника. — 1956. — Т. 11. — № 2. — С. 60–63.
4. Овсеевич И.А. Предсказание и корректирование в канале с замираниями / И.А. Овсеевич, М.С. Пинскер // Изв. АН СССР. Энергетика и автоматика. — 1960. — № 3. — С. 145–159.

Поступила в редакцию 14.04.2008 г.