

Глава 5

ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЭМС РЭС ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ РАЗЛИЧНЫХ ПОМЕХ В СИСТЕМАХ СВЯЗИ

Традиционными методами обеспечения ЭМС РЭС являются организационные меры, применяемые при их планировании и направленные на обеспечение необходимого частотно-территориального разнеса между РЭС, которые могут создавать друг другу помехи. Однако эти методы, являясь пассивными, не позволяют достичь высокой эффективности использования РЭС. Это может быть достигнуто путем применения активных методов — разного рода устройств подавления помех.

Помехи, возникающие при работе систем связи в общих либо соседних полосах частот, могут быть как непрерывными, так и импульсными. Непрерывные помехи часто возникают, в частности, на магистральных (радиорелейных и спутниковых) линиях связи. В течение многих лет на таких линиях применялись системы связи, в которых использовались частотное уплотнение (ЧУ) и частотная модуляция (ЧМ). Эти системы используются и в настоящее время, хотя в последние десятилетия все большее распространение получают системы связи с цифровыми видами модуляции. Типичным видом непрерывных помех в системах с ЧМ являются помехи от аналогичных систем, также использующих ЧМ. Так, например, на прием сигналов на станциях радиорелейных систем либо на Земных станциях спутниковых систем связи могут воздействовать помехи от других станций, которые работают в тех же полосах частот. Для подавления помех в этих случаях могут использоваться как одноканальные, так и многоканальные компенсаторы помех (КП). Универсальные КП — это устройства, которые формируют копию помехи и вычитают эту копию из принимаемого сигнала, содержащего полезную и мешающую компоненты. Такие компенсаторы позволяют бороться с самыми разнообразными мешающими сигналами, включая сигналы, вид модуляции которых совпадает с видом модуляции полезного сигнала.

В тех случаях, когда невозможно применить традиционные методы обеспечения ЭМС радиосистем с помощью их территориального или частотного разнеса, КП позволяют организовать одновременную работу взаимно воздействующих радиолиний. К данной проблеме примыкает проблема повышения эффективности использования РЭС путем создания систем передачи в общей полосе частот нескольких ЧМ сигналов, с помощью которых передаются независимые сообщения. Применение таких систем позволило бы повысить пропускную способность каналов связи.

Другой важной проблемой борьбы с помехами является проблема подавления импульсных помех (ИП), создаваемых системам радиорелейной и спутниковой связи средствами радиолокации и радионавигации. Во многих случаях уровень импульсной помехи оказывается столь значительным, что приводит к блокированию приемника и к «стиранию» пораженных ИП участков полезного сигнала (ПС). В этих случаях эффективны методы подавления ИП и восстановления пораженных участков ПС путем экстраполяции либо интерполяции. Поскольку на практике длительность ИП часто бывает весьма короткой по сравнению со вре-

менем корреляции полезного сообщения, частота их повторения незначительна, а уровень вполне достаточен для их надежного обнаружения, то во многих случаях конструкцию устройств подавления импульсных помех можно значительно упростить.

В России реальные проблемы защиты от ИП возникли на станциях тропосферных радиорелейных линиях связи (ТРРЛ) сети «Север», обеспечивающей связью районы Крайнего севера. Качество приема сигналов на этих станциях заметно снижалось из-за действия ИП со стороны наземных радиолокаторов отечественной системы воздушной радионавигации (ВРН). Подобная проблема возникла также и на Земных приемных станциях отечественной спутниковой системы непосредственного телевизионного вещания «Экран», которые испытывали помехи со стороны самолетных радиосистем ближней навигации.

Проблемы подавления непрерывных и импульсных помех возникает и в других системах связи, и для их решения были разработаны разнообразные методы [1]. Следует подчеркнуть, что при разработке структуры устройств подавления помех и оценке их эффективности важную роль играют созданная академиком В.А. Котельниковым теория потенциальной помехоустойчивости и основанная на ней теория оптимального приема сигналов с непрерывными видами модуляции. Эти теории дают инженерам мощный инструмент для синтеза оптимальных устройств и позволяют определить пределы эффективности подавления помех, которая может быть достигнута при применении этих устройств.

В настоящей главе кратко рассмотрены вопросы синтеза оптимальных КП и устройств подавления ИП, описаны принципы их работы и приведены оценки эффективности применения таких устройств в системах радиорелейной и спутниковой связи. Рассмотрены следующие устройства:

- одноканальные КП с обработкой суммы полезного и мешающего АМ или ЧМ сигналов, поступающих на вход приемника;
- многоканальные КП, в которых на вход каждого из каналов поступают, помимо полезного ЧМ сигнала, один или несколько мешающих ЧМ сигналов из других каналов приема;
- подавители ИП с бланкированием тракта приема сигнала во время действия ИП;
- подавители ИП, построенные по схеме «широкая полоса–ограничитель–узкая полоса»;
- подавители ИП с преобразованием спектра и ограничением сигнала;
- подавители ИП с восстановлением пораженных участков полезного сигнала путем экстраполяции или интерполяции;
- подавители ИП в системах связи, в которых применяется частотное разнесение.

Более подробные сведения о рассмотренных в данной главе устройствах и методах анализа их помехоустойчивости можно найти в статьях и книгах, которые указаны в списке литературы к данной главе.

5.1. Обеспечение ЭМС при помощи одноканальных компенсаторов помех

Оптимальные одноканальные КП представляют собой устройства, предназначенные для разделения АМ и ЧМ сигналов, одновременно поступающих на вход приемника. Они могут быть синтезированы на основе теории оптимального приема непрерывных сигналов [2]. Такие устройства должны с наивысшей точностью выделять сообщение $a_i(t)$ из сложного сигнала $W(t)$, представляющего собой сумму N сигналов, действующих на входе приемника:

$$W(t) = A \sum_{i=1}^N \mu_i S_i(t, a_i, \bar{\lambda}_i) + n(t) = S(t, \bar{a}, \bar{\lambda}) + n(t), \quad (5.1)$$

где $S_i(t, a_i, \bar{\lambda}_i)$ — i -й сигнал, поступающий на вход приемника и модулированный сообщением $a_i(t)$; $\bar{\lambda}_i$ — его параметры; $\mu_i A$ — амплитуда i -го сигнала; $n(t)$ — белый гауссов шум с односторонней спектральной плотностью N_0 . Для АМ, ФМ и ЧМ соответственно имеем:

$$S_i(t, a_i, \bar{\lambda}_i) = [1 + a_i(t)] \sin(\omega_i t + \varphi_i);$$

$$S_i(t, a_i, \bar{\lambda}_i) = \sin(\omega_i t + a_i(t) + \varphi_i);$$

$$S_i(t, a_i, \bar{\lambda}_i) = \sin\left(\omega_i t + \int_{-\infty}^t a_i(t) dt + \varphi_i\right).$$

Здесь ω_i и φ_i — несущая частота и фаза i -го сигнала. Если в уравнении (5.1) $N = 2$, то анализ, проведенный на основе теории оптимального приема, приводит к следующим уравнениям [3], описывающим работу оптимального устройства:

$$a_i^*(t) = \mu_i H(p) \left\{ \left[W(t) - S_i(t, a_i, \bar{\lambda}_i) \right] \frac{\partial S_i(t, a_i, \bar{\lambda}_i)}{\partial a_i} \right\}, \quad (5.2)$$

где $a_i^*(t)$ — оптимальная оценка процесса $a_i(t)$; $H(p)$ — операторное изображение переходной характеристики линейного фильтра, определяемой при помощи корреляционной функции процесса $a_i(t)$.

На рис. 5.1 показана блок-схема слеящего компенсатора помех, моделирующего уравнение (5.2) при $N = 2$. Это устройство на входе имеет две ветви приема, в каждой из которых выполняется оценка одного из сообщений $a_i(t)$. Эти оценки поступают на модуляторы, где они преобразуются в сигналы $\mu_i S_i(t, a_i^*, \bar{\lambda}_i)$ и $\mu_i \frac{\partial S_i(t, a_i^*, \bar{\lambda}_i)}{\partial a_i}$. Первые из них суммируются, формируя копию принимаемого сигнала $W^*(t)$, а вторые подаются на умножители в каждой ветви. Копия $W^*(t)$ по цепи обратной связи подается на вход устройства, где она вычитается из принимаемого сигнала. Для некоторых видов сигналов $S_i(t, a_i, \bar{\lambda}_i)$ (АМ, ЧМ и т.д.) приемник, представленный на рис. 5.1, может быть существенно упрощен.

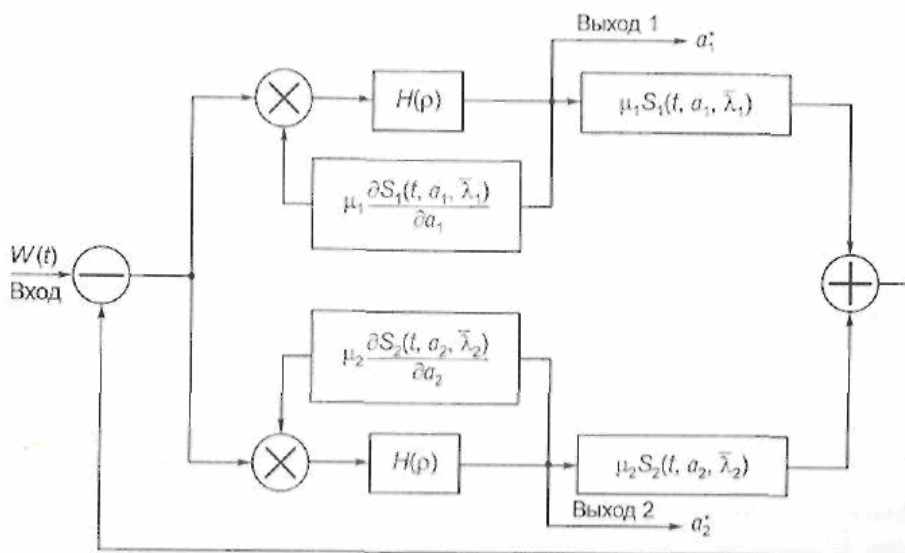


Рис. 5.1. Блок-схема оптимального приемника, разделяющего два сигнала с аналоговой модуляцией

5.1.1. Оптимальный следящий КП для двух ЧМ сигналов

Блок-схема оптимального КП показана на рис. 5.2. В схему входят два вычитателя, по одному на входе каждого канала, и два синхронных фазовых детектора (СФД), состоящих из фазового детектора (ФД) и генератора, управляемого напряжением (ГУН). Аттenuаторы регулируются таким образом, чтобы на их выходе амплитуды ЧМ сигналов были равны амплитудам компенсируемых сигналов. Теоретические исследования [3–9] помехоустойчивости приема двух ЧМ сигналов с использованием такого КП, выполненные как на основе аналитических методов, так и математического моделирования, показали, что:

- ЧМ сигналы могут быть полностью разделены без переходных помех между ними, если они имеют несущие одной и той же частоты и одинаковой амплитуды, сдвиг фаз между которыми равен 90° , что позволяет вдвое увеличить емкость систем, использующих ЧМ, без какого-либо расширения занимаемой полосы частот;
- если фазовый сдвиг между разделяемыми ЧМ сигналами случаен и может принимать любые значения, то для их эффективного разделения с малыми переходными помехами необходимо увеличить частотный разнос между несущими частотами;
- целесообразно применять оптимальные приемники с КП и при значительном частотном разнесе, поскольку в приемниках этого типа, в противоположность стандартным типам приемников, уровень помех на выходе демодулятора не зависит от уровня мешающего сигнала на входе.

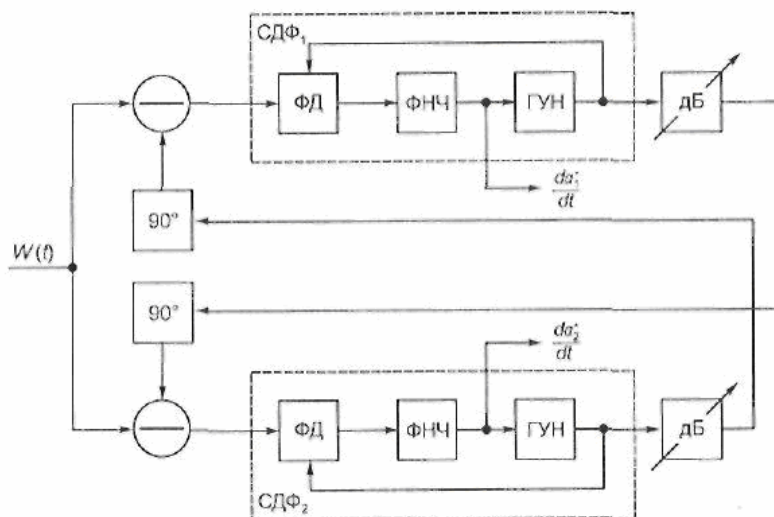


Рис. 5.2. Блок-схема оптимального КП для разделения двух ЧМ сигналов

5.1.2. Оптимальное устройство для разделения двух АМ сигналов

Устройство, синтезированное на основе теории оптимального приема непрерывных сигналов [10], показано на рис. 5.3, где обозначено: Огр — ограничитель, СД — синхронный детектор.

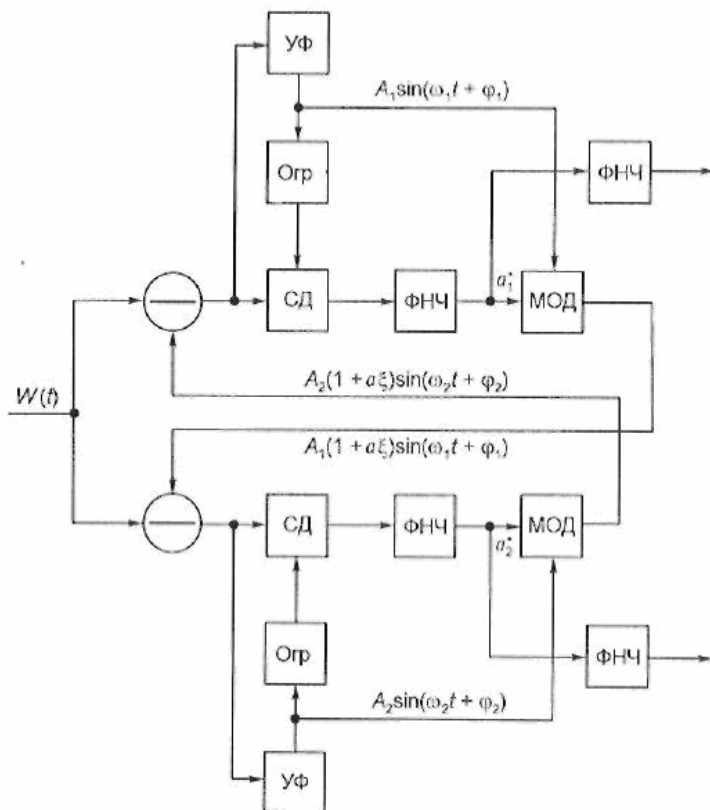


Рис. 5.3. Блок-схема оптимального устройства разделения АМ сигналов

Узкополосные фильтры (УФ) выделяют из принимаемого сигнала несущую частоту. В одной ветви несущая частота после ограничения в полосовом ограничителе подается на синхронные детекторы соответствующих сигналов, а в другой — модулируется в амплитудных модуляторах (МОД) оценками полезных сообщений. Сигналы с выхода синхронных детекторов фильтруются с помощью ФНЧ. Вычитатели в устройстве на рис. 5.3 предназначены для компенсации переходных помех между каналами. Анализ эффективности подавления АМ помехи с помощью этого устройства показал [10], что данный компенсатор:

- эффективно разделяет два АМ сигнала, занимающих общую полосу частот;
- увеличивает помехоустойчивость приема по сравнению с обычным синхронным приемником, причем это улучшение тем значительнее, чем больше амплитуда помехи, что объясняется возможностями оптимального приемника в подавлении помехи;
- в присутствии на входе мешающих сигналов оптимальный приемник имеет существенно более высокое (на 25–28 дБ) отношение сигнал/шум на выходе по сравнению с обычным синхронным приемником при расстройке между несущими, равной верхней модулирующей частоте, и при отношении мощностей полезного сигнала и помехи на входе 0 дБ.

5.1.3. Итерационные КП

Оптимальные КП представляют собой устройства с обратной связью, проектирование которых существенно усложняется из-за необходимости обеспечения их устойчивости и, одновременно, хорошей фильтрации разделяемых информационных сигналов. В случае, если уровни

разделяемых сигналов существенно отличаются, из структуры оптимального КП с обратной связью могут быть получены структуры оптимальных итерационных КП [11, 12], в которых проблема обеспечения устойчивости не возникает. Такие КП могут иметь несколько ступеней компенсации, в каждой из которых для фильтрации сообщений применяют фильтры с частотными характеристиками, близкими к идеальным (амплитудная характеристика близка к прямоугольной, а фазовая — к линейной). Итерационные КП позволяют достичь высокой эффективности разделения двух сигналов с ЧМ, передаваемых в общей полосе частот.

На рис. 5.4 представлена обобщенная схема итерационного КП, который работает следующим образом. В Дем₁ первой ступени осуществляется демодуляция 1-го сигнала. Для случая ЧМ таким демодулятором может быть как обычный частотный дискриминатор, на выходе которого установлен фильтр с частотными характеристиками, близкими к идеальным, так и следящий демодулятор [13]. На выходе Дем₁ формируются оценка 1-го информационного сигнала и копия сигнала, имеющего на входе КП большой уровень. Амплитуда и фаза этого сигнала при помощи стандартных цепей автоматической регулировки устанавливаются такими же, как и у первого сигнала на входе устройства. (В итерационном КП для ЧМ сигналов вместо цепей автоматической регулировки могут быть применены узкополосные следящие режекторные фильтры.) Эта копия вычитается из входного сигнала и поступает на вход Дем₂ этой же ступени. Этот демодулятор выполняет те же функции, что и Дем₁. В результате на вход Дем₁ второй ступени поступает сигнал, уровень которого по отношению к уровню остатка мешающего сигнала (МС) увеличен по сравнению с отношением уровней 1-го и 2-го сигналов на входе устройства. Каждая последующая ступень итерационного КП улучшает отношение сигнал/помеха на входе образующих эту ступень Дем₁ и Дем₂.

Следует отметить, что первая ступень итерационного КП представляет собой компенсатор, предложенный в 1959 г. американским ученым Е. Дж. Багдади для выделения слабого ЧМ сигнала из суммы двух ЧМ сигналов, действующих в общей полосе частот.

На рис. 5.5 показана более подробная блок-схема одной ступени итерационного КП. В ней мгновенная частота ГУН₁ управляется напряжением с выхода частотного детектора ЧД₁. На выходе ЧД₁ формируется оценка $a_{11}^*(t)$ сообщения $a_1(t)$. Это напряжение из-за присутствия на входе устройства двух ЧМ сигналов и шума пропорционально (с определенной погрешностью) мгновенной частоте ЧМ сигнала с большей амплитудой на входе устройства.

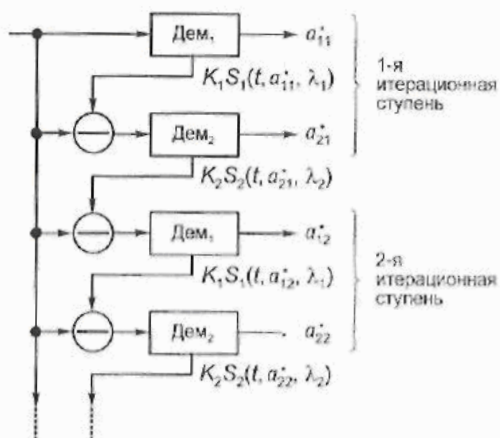


Рис. 5.4. Блок-схема итерационного КП

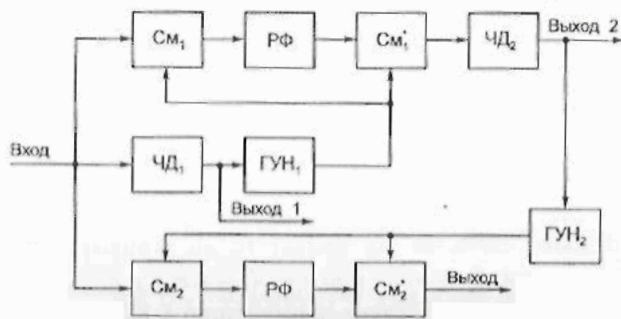


Рис. 5.5. Блок-схема одной ступени итерационного КП

Блок, состоящий из последовательно соединенных смесителя ($См_1$), узкополосного режекторного фильтра (РФ) и смесителя ($См_1^*$), показанный на рис. 5.5, представляет собой следящий РФ (СРФ), режектирующий сигналы, мгновенная частота которых совпадает с мгновенной частотой ГУН₁. Работает следящий РФ следующим образом. В $См_1$ формируются сигналы разностной частоты между сигналами, поступающими на вход устройства, и сигналом на выходе ГУН₁. Так как законы изменения мгновенной частоты этого сигнала и частоты ГУН₁ отличаются незначительно, сигнал большего уровня в первом $См_1$ преобразуется в сигнал, близкий к гармоническому. Этот сигнал подавляется в узкополосном РФ, установленном на выходе $См_1$. Второй же (более слабый) ЧМ сигнал в этом же $См_1$ преобразуется в широкополосный, который проходит на выход узкополосного РФ с незначительными искажениями. В $См_1^*$ этот широкополосный сигнал преобразуется в сигнал, закон изменения частоты которого повторяет закон изменения частоты второго ЧМ сигнала ($a_2(t)$), а остаток напряжения гармонического сигнала на выходе РФ преобразуется в дополнительную помеху, наложенную на этот сигнал. Во втором ЧД₂ осуществляется демодуляция второго ЧМ сигнала, и формируется оценка $a_{21}^*(t)$. Напряжение на выходе ЧД₂ изменяет мгновенную частоту ГУН₂. Во втором следящем РФ ($См_2$ – РФ – $См_2^*$), на который в качестве опорного напряжения подается сигнал с выхода ГУН₂, аналогично тому, как это было описано выше, осуществляется подавление слабого ЧМ сигнала. Выход второго следящего РФ является выходом 1-й ступени итерационного КП.

Развитая в [11] теория позволяет оптимизировать параметры фильтров, установленных на выходе Дем, и оценить влияние параметров РФ на эффективность выделения слабого сигнала с помощью итерационного КП. В [12] рассмотрен случай, когда на выходе Дем применяются фильтры Баттерворса n -го порядка и фазовые корректоры. В [14] разработан простой аналитический метод синтеза фазовых корректоров на основе полиномов Бесселя, а в [15] методом моделирования исследованы пороговые явления при разделении двух ЧМ сигналов итерационным КП.

Основные результаты исследований итерационных КП для ЧМ сигналов состоят в следующем:

- с помощью КП Багдади можно достичь высокого качества приема слабого ЧМ сигнала лишь при условии, что индекс ЧМ сигналов имеет достаточно большое значение ($m \geq 8$);
- используя в КП фильтры Баттерворса высокого порядка ($n = 4-8$) и фазовые корректоры, можно обеспечить более высокое качество демодуляции слабого ЧМ сигнала по сравнению с качеством демодуляции сильного.

Результаты исследований итерационного КП для двух ЧМ сигналов представлены на рис. 5.6, на котором изображены зависимости коэффициентов γ_{1l} и γ_{2l} от l — числа ступеней итерации в КП, эти коэффициенты показывают, на сколько децибел мощность шума в телефонных каналах на первом (сплошные кривые — γ_{1l}) и втором (пунктирные кривые — γ_{2l}) выходах l -й ступени КП превосходит мощность шума, которая была бы в том случае, если бы прием как сильного, так и слабого сигналов осуществлялся в отсутствии помех. Эти зависимости построены для случая, когда отношение мощности сильного сигнала к мощности шума в информационной полосе равно 30 дБ, а слабого сигнала — 20 дБ, т.е. соотношение уровней сильного и слабого сигналов составляет 10 дБ. Кривые l построены для случая $n = 2$ и $m = 2$; 2 — $n = 4$ и $m = 4$; 3 — $n = 3$ и $m = 4$; 4 — $n = 4$ и $m = 2$; 5 — $n = \infty$ и $m = 2$; 6 — $n = \infty$ и $m = 4$. (Случаю $n = \infty$ соответствует применению в КП идеальных фильтров с прямоугольной амплитудно-частотной и линейной фазовой характеристикой.)

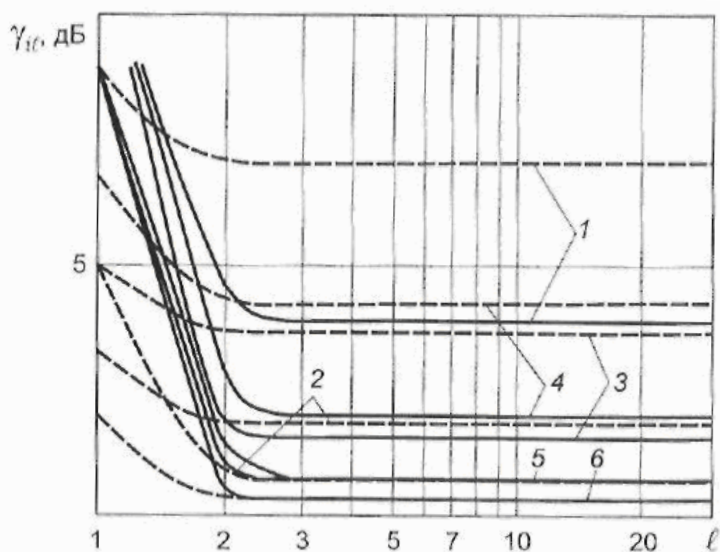


Рис. 5.6. Зависимости γ_{it} , $i = 1, 2$, от ℓ

Анализ кривых показывает, что в большинстве случаев применение двух или трех ступеней итераций позволяет достичь предельной (при заданных характеристиках низкочастотных фильтров) эффективности компенсатора. Применение двухкаскадного итерационного КП вместо КП Багдади дает выигрыш при разделении ЧМ сигналов, равный примерно 10 дБ. Кроме того, из рис. 5.6 видно, что даже при использовании в КП фильтров 4-го порядка и не очень больших значениях индекса модуляции ($m = 2$) разделение двух ЧМ сигналов итерационным КП позволяет обеспечить качество приема, не намного уступающее качеству их приема при отсутствии МС.