

# **Применение бинарной структуры в оптимальных фильтрах для последовательностей импульсных сигналов**

**А.В. Горбунов**

Южный федеральный университет

## **Введение**

Повышение помехоустойчивости радиоприёма является одной из важнейших проблем радиотехники и может быть достигнуто различными способами: увеличением мощности передатчика, охлаждением входного радиотракта приемника, использованием квантовых усилителей, сужением диаграммы направленности антенны [1], а также применением устройств, осуществляющих оптимальное выделение (фильтрацию) импульсных сигналов из шумовых помех [2].

## **Принципы построения оптимальных фильтров для последовательности импульсных сигналов**

В радиолокации принимаемый сигнал обычно представляет собой последовательность импульсов. Период их повторения  $T$  определяется периодом повторения импульсов, вырабатываемых передающим устройством системы. Длительность этой последовательности равняется времени, в течение которого передающее устройство излучает зондирующие импульсы, а приёмное устройство осуществляет приём отраженных сигналов. Применение оптимальных фильтров для одиночных импульсных сигналов позволяет получить сравнительно небольшой выигрыш в помехоустойчивости по сравнению с использованием апериодических, резонансных и полосовых усилителей. В свою очередь оптимальные фильтры для *последовательностей импульсных сигналов* позволяют значительно повысить помехоустойчивость системы, что определяет актуальность проводимых исследований.

Импульсная характеристика оптимального фильтра для последовательности, состоящей из  $M$  импульсных сигналов, должна воспроизводить в некотором масштабе форму сигнала (иметь вид последовательности из  $M$  видеоимпульсов). Структурная схема оптимального фильтра для последовательности, состоящей из  $M$  импульсных сигналов [2], представлена на рис. 1.

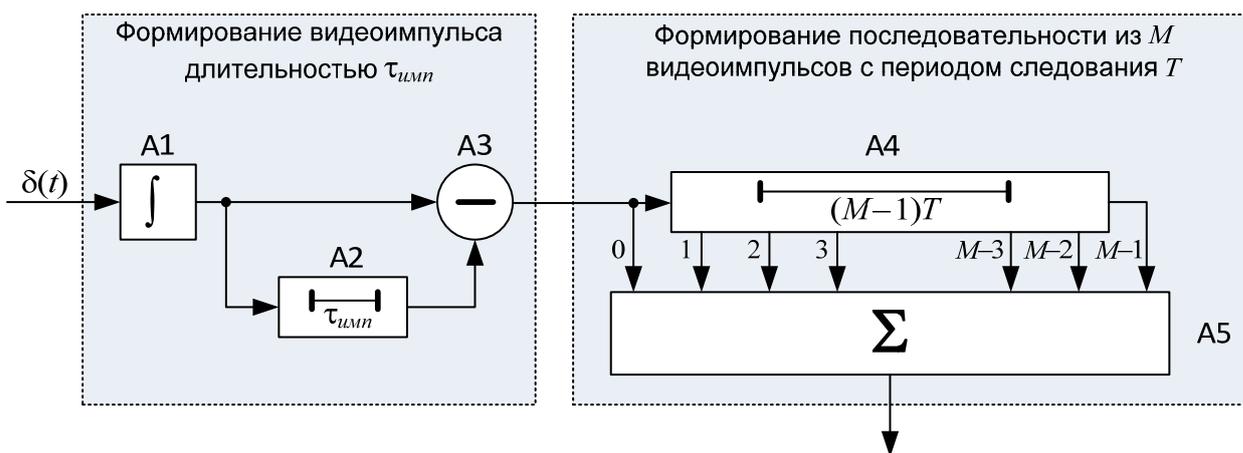


Рис. 1. Структура оптимального фильтра для последовательности, состоящей из  $M$  импульсных сигналов

Одиночный прямоугольный видеоимпульс длительностью  $\tau_{имп}$  формируется в результате действия дельта-функции  $\delta(t)$  на фильтр, оптимальный этому видеоимпульсу и состоящий из интегрирующего устройства A1, задерживающего на длительность импульса  $\tau_{имп}$  устройства A2 и вычитающего устройства A3 (см. рис. 1). Для преобразования этого видеоимпульса в последовательность из  $M$  импульсов можно использовать задерживающее устройство A4 с общим временем задержки  $(M-1)T$  и с  $(M-1)$  равномерно расположенными отводами с периодом  $T$ , а также суммирующее устройство A5.

### Использование рециркуляторов в составе оптимальных фильтров

Наибольшее распространение в качестве устройства формирования копий импульсов получили рециркуляторы (рис. 2).

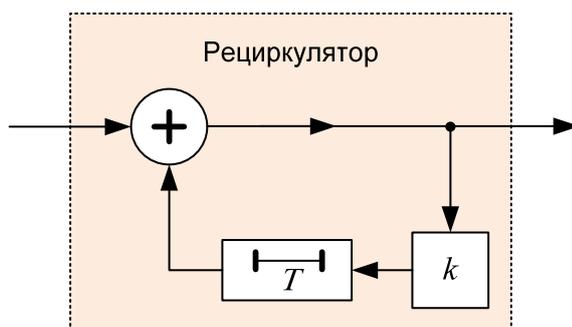


Рис. 2. Типовая схем рециркулятора

Рециркулятор состоит из сумматора и петли обратной связи, включающей в свой состав линию задержки на время  $T$  и устройство для получения общего коэффициента передачи по цепи обратной связи  $k < 1$  (например, аттенюатор). Наличие в цепи обратной связи аттенюатора необходимо для устранения самовозбуждения рециркулятора при коэффициенте передачи по цепи обратной связи, близком к единице. Для обеспечения устойчивой работы практически осуществимыми являются рециркуляторы с коэффициентом передачи в цепи обратной связи  $k$ , не превышающем 0,95.

В работе [2] показано, что применение рециркулятора в оптимальном фильтре для последовательности импульсных сигналов позволяет получить выигрыш в отношении сигнал-шум по мощности  $B$  (в сравнении с оптимальным фильтром для одиночных импульсов), который определяется выражением

$$B = \frac{1+k}{1-k} (1-k^M)^2, \quad (1)$$

где  $B$  – выигрыш в отношении сигнал-шум;  $k$  – коэффициент передачи в цепи обратной связи;  $M$  – количество принимаемых во внимание копий сигнала.

Анализ данного соотношения показывает, что при постоянном  $k$  выигрыш  $B$  возрастает с увеличением числа импульсов  $M$  сначала быстро, потом медленнее и затем практически остается постоянным. Последнее объясняется тем, что при  $k^M \rightarrow 0$  сигнал перестает накапливаться (рис. 3).

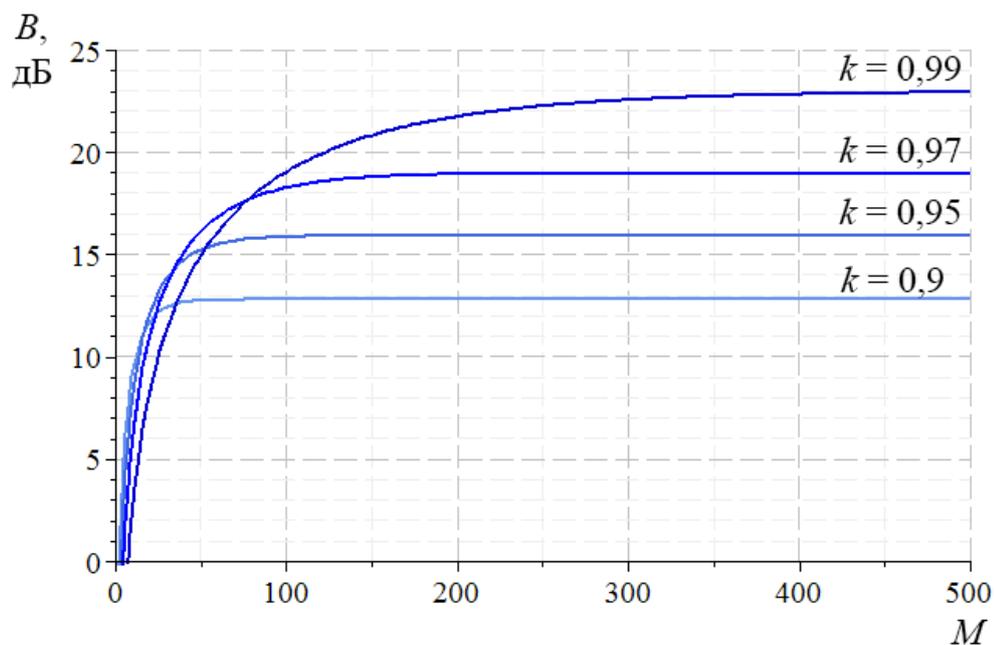


Рис. 3. Выигрыш  $B$  в отношении сигнал-шум при использовании рециркулятора и обработке  $M$  копий сигнала

Из рис. 3 видно, что для осуществимого с практической точки зрения значения коэффициента передачи в цепи обратной связи рециркулятора  $k = 0,95$  максимальное значение выигрыша в отношении сигнал-шум составляет около 15 дБ при числе копий около 50. Увеличение коэффициента передачи  $k$  до уровня 0,99 позволило бы достичь выигрыша более 22 дБ при числе обрабатываемых копий около 250. Однако использование рециркуляторов с коэффициентом передачи в цепи обратной связи  $k > 0,95$  может привести к возбуждению рециркулятора из-за кратковременных флуктуаций его параметров.

Создание задерживающего устройства нерециркуляционного типа, предназначенного для формирования большого числа импульсов (десятки и сотни), является достаточно сложной технической задачей. Такое устройство должно обладать по возможности равномерной амплитудно-частотной характеристикой, малым значением потерь и высокой идентичностью формируемых копий, так как от этих параметров зависит выигрыш в отношении сигнал-шум при использовании оптимального фильтра для последовательности импульсных сигналов.

## Нерециркуляционная бинарная структура

Одним из возможных вариантов нерециркуляционных устройств формирования копий импульсов, удовлетворяющих большинству приведённых выше требований, является бинарная структура [3, 4].

Типовая  $N$ -каскадная бинарная структура (рис. 4) состоит из разветвителя  $Y$ -типа  $Y_1$ ,  $(N-1)$  разветвителей  $X$ -типа  $X_2...X_N$  и сумматора  $S_{N+1}$ , а также из  $N$  линий задержки  $LЗ_1...LЗ_N$ . Если необходимо сформировать  $M = 2^N$  копий входного сигнала с периодом задержки  $\tau_{зад}$ , то время задержки первой линии задержки должно быть  $\tau_{зад}$ , второй –  $2\tau_{зад}$ ,  $j$ -й –  $2^{j-1}\tau_{зад}$ , то есть время задержки каждой последующей линии задержки увеличивается в два раза, что и объясняет термин «бинарная» структура.

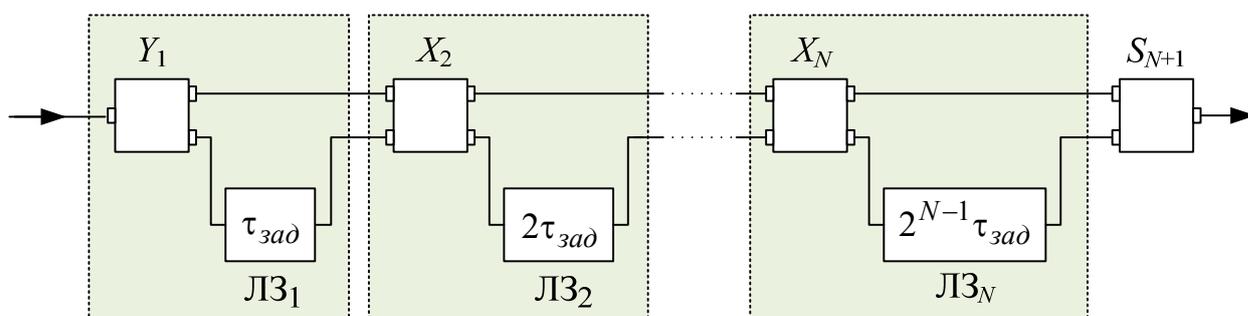


Рис. 4. Применение  $N$ -каскадной бинарной структуры для формирования  $M = 2^N$  копий импульсного сигнала

Принцип формирования копий сигнала в бинарной структуре заключается в ответвлении в каждом разветвителе части сигнала в соответствующую линию задержки с последующим суммированием составляющих излучения, прошедших по разным траекториям и имеющих различные времена задержки.

В работе [3] показано, что применение бинарной волоконно-оптической структуры (ВОС) в динамическом запоминающем устройстве для формирования копий импульсного сигнала позволяет добиться высокой идентичности копий. Использование для создания бинарной структуры элементов волоконной оптики позволяет за счёт практически неограниченной полосы пропускания и сверхнизких потерь в оптическом

волокне (около 0,2 дБ на 1 км волокна, что соответствует 0,04 дБ на 1 мкс задержки) получить результаты, не достижимые с использованием других технологий обеспечения задержки сигнала. Для работы с радиосигналами бинарная ВОС дополняется на входе передающим оптическим модулем для преобразования импульсного радиосигнала в импульсный оптический сигнал и приёмным оптическим модулем на выходе бинарной ВОС для обратного преобразования сигналов [3, 4]. Современные оптоэлектронные преобразователи имеют полосу пропускания до 100 ГГц, что позволяет обеспечить работу устройства в большей части СВЧ-диапазона [4, 5].

Преимущество именно *бинарной ВОС* над волоконно-оптическими структурами других типов (например, многоотводными линиями задержки [6, 7] или оптическими рециркуляторами [8, 9]) является то, что все копии сигнала проходят через одинаковое количество портов ответвителей и соединений оптического волокна, обеспечивая тем самым равные потери оптического излучения для всех копий. Неидентичность сформированных копий определяется только потерями, обусловленными различной длиной световодов, используемых в волоконно-оптических линиях задержки.

### **Использование бинарной ВОС в составе оптимальных фильтров**

Бинарная ВОС является нерециркуляционной структурой, то есть её самовозбуждение принципиально невозможно. Эта особенность, а также высокая идентичность формирования копий определяют целесообразность использования динамических запоминающих устройств на основе бинарной ВОС в оптимальных фильтрах для последовательности импульсных сигналов, особенно при большом числе обрабатываемых импульсов.

В работе [3] показано, что при периоде следования копий 100 нс оптическая мощность каждой следующей копии сигнала на выходе бинарной ВОС ниже мощности предыдущей копии на 0,0069 дБ, что соответствует параметру  $k$  рециркулятора, равному  $\sqrt{10^{-2 \times 0,0069/10}} \approx 0,998$  (здесь множитель 2 в степени подкоренного выражения учитывает тот факт, что

мощность радиосигнала на выходе приёмного оптического модуля пропорциональна квадрату мощности оптического сигнала на его входе).

На рис. 5 показана зависимость выигрыша в отношении сигнал-шум (1) от числа обрабатываемых копий для  $k = 0,95$  (максимальное значение при использовании рециркуляторов) и  $k = 0,998$  (использование ДЗУ на основе типовой бинарной ВОС). Ввиду большого количества принимаемых во внимание копий при  $k \rightarrow 1$  ось абсцисс представлена в логарифмическом виде.

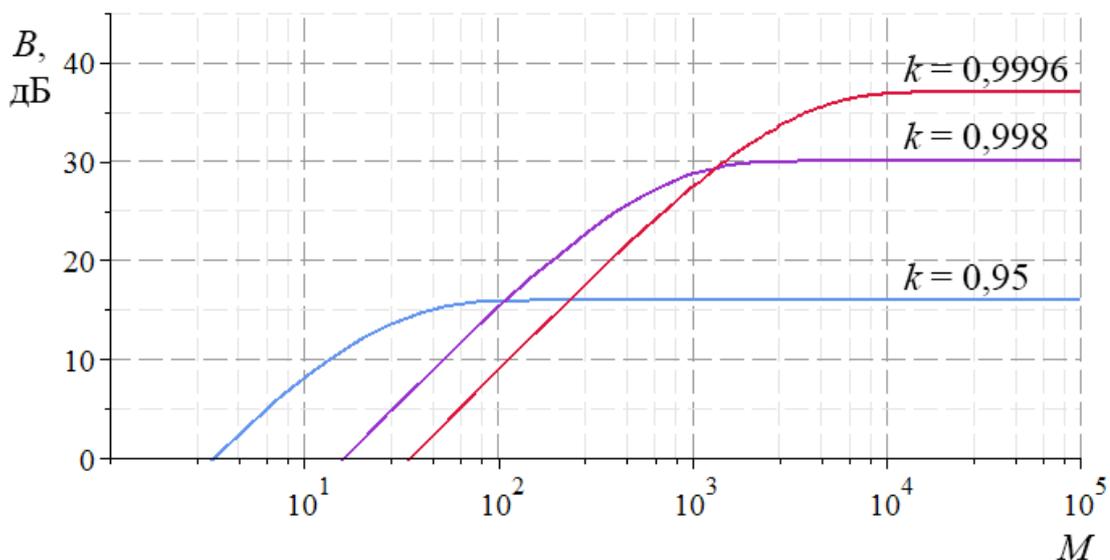


Рис. 5. Выигрыш в отношении сигнал-шум при использовании ДЗУ на основе бинарной ВОС

Из рисунка видно, что применение ДЗУ на основе типовой бинарной ВОС позволяет значительно увеличить количество обрабатываемых копий  $M$  и достичь выигрыша в отношении сигнал-шум около 30 дБ при  $k = 0,998$  и числе копий более 3000. Для 10-каскадной бинарной структуры ( $M = 1024$ ) выигрыш составит 28,8 дБ.

В работе [10] предложен метод повышения идентичности формируемых копий в ДЗУ на основе бинарной ВОС. Техническое решение [11] позволяет без применения активных элементов за счет использования ответвителей с заданными коэффициентами ответвления значительно повысить идентичность копий. Так, в 12-каскадной бинарной ВОС (что

соответствует формированию 4096 копий) при использовании ответвителей с точностью выполнения коэффициентов ответвления 0,1 отношение мощностей копий с максимальной и минимальной амплитудами на выходе ДЗУ составит 13,23 дБ, что соответствует параметру  $k$  рециркулятора, равному  $\sqrt{10^{-13,2/10}} \approx 0,9996$ .

Зависимость выигрыша в отношении сигнал-шум от числа обрабатываемых копий для  $k = 0,9996$  также приведена на рис. 4. Видно, что в этом случае возможно достичь выигрыша в отношении сигнал-шум около 37 дБ при количестве обрабатываемых копий более 10000. При  $M = 4096$  выигрыш составит около 35 дБ, что на 6,2 дБ (или в 4,2 раза) больше, чем при использовании типовой бинарной ВОС с  $M = 1024$ . Изготовление ответвителей с более высокой точностью позволит увеличить максимально возможное число обрабатываемых в оптимальном фильтре копий и дополнительно повысить выигрыш в отношении сигнал-шум.

### **Заключение**

Результаты проведенного анализа показывают, что использование в оптимальных фильтрах последовательности импульсных сигналов рециркуляторов с коэффициентом передачи цепи обратной связи  $k = 0,95$  позволяет достичь выигрыша в отношении сигнал-шум (по сравнению с оптимальным фильтром для одиночных импульсов) около 15 дБ при количестве обрабатываемых копий около 50. Применение вместо рециркулятора бинарной ВОС, выполненной по типовой схеме [3, 4], позволяет достичь выигрыша в отношении сигнал-шум около 28,8 дБ при количестве обрабатываемых копий 1024 (что соответствует увеличению выигрыша на 13,8 дБ или в 24 раза по сравнению с использованием рециркулятора). Использование технического решения [11], разработанного на основе метода повышения идентичности копий в бинарной ВОС [10], позволяет достичь выигрыша в отношении сигнал-шум около 35 дБ при

количестве обрабатываемых копий 4096 (что соответствует выигрышу на 20 дБ или в 100 раз по сравнению с рециркулятором).

Таким образом, полученные результаты позволяют сделать вывод, что применение динамического запоминающего устройства на основе бинарной ВОС в составе оптимальных фильтров последовательности импульсных сигналов позволяет значительно улучшить выигрыш в отношении сигнал-шум по сравнению с применением рециркуляторов. Кроме того, решение задачи повышения идентичности копий в бинарной ВОС обеспечивает дополнительный выигрыш в отношении сигнал-шум для оптимальных фильтров последовательности импульсных сигналов.

### **Литература:**

1. Тихомиров А.В., Омелянчук Е.В, Кривошеев А.В. Особенности проектирования систем связи миллиметрового диапазона радиоволн [Электронный ресурс] // Инженерный вестник Дона, 2013, №1. – Режим доступа: <http://ivdon.ru/magazine/archive/n2y2013/1742> (доступ свободный). – Загл. с экрана. – Яз. рус.

2. Лёзин Ю.С. Оптимальные фильтры и накопители импульсных сигналов [Текст]. – Изд. 2-е, перераб. и доп.: М.: Советское радио, 1969. – 448 с.

3. Румянцев К.Е., Горбунов А.В. Динамические запоминающие устройства на основе бинарных волоконно-оптических структур [Текст] // Радиотехника. – 2002. – №12. – С.73-80.

4. Динамическое запоминающее устройство радиосигналов с бинарной волоконно-оптической структурой [Текст]: пат. 2210121 Рос. Федерация: МПК 7 G 11 C 11/401, 11/42, G 02 B 6/00 / Румянцев К.Е., Горбунов А.В.; заявитель и патентообладатель Юж.-Рос. гос. ун-т экономики и сервиса. – № 2002116859/09; заявл. 24.12.2001; опубл. 10.08.2003, Бюл. № 22.

5. XPDV412xR 100GHz Photodetector Product Brief. – URL: [http://www.finisar.com/sites/default/files/pdf/XPDV412xR\\_100GHz\\_Photodetector\\_Product\\_Brief.pdf](http://www.finisar.com/sites/default/files/pdf/XPDV412xR_100GHz_Photodetector_Product_Brief.pdf).

6. Tapped optical fiber delay line: Patent 4558920 USA; G 02 B 6/28, 6/34, H 04 B 10/12, G 02 B 005/172 / Newton S.A., Bowers J.E.; № 323038; filed 19.11.1981; publ. 17.12.1985.

7. Microbend optical fiber tapped delay line: Patent 4557552 USA; G 02 B 6/28, 6/42, 005/172 / Newton S.A., Cutler C.C.; № 323037; filed 19.11.1981; publ. 10.12.1985.

8. Splice-free fiber optic recirculating memory: Patent 4473270 USA; G 11 C 19/30, 21/00, 19/00, G 02 B 005/172 / Shaw H.J.; № 314473; filed 23.10.1981; publ. 25.09.1984.

9. Dual coupler fiber optic recirculating memory: Patent 4479701 USA; G 02 B 6/28, 005/172 / Newton S.A., Bowers J.E., Shaw H.J.; № 326215; filed 01.12.1981; publ. 30.10.1984.

10. Горбунов А.В. Повышение идентичности формируемых копий в динамическом запоминающем устройстве [Текст] / А.В. Горбунов, К.Е. Румянцев // Петербургский журнал электроники. – 2003. – №4. – С.49-56.

11. Динамическое запоминающее устройство радиосигналов с последовательной бинарной волоконно-оптической структурой [Текст]: пат. 2255426 Рос. Федерация: МПК 7 H 04 B 10/00, G 02 B 6/00, G 01 S 7/40 / Румянцев К.Е., Горбунов А.В.; заявитель и патентообладатель Юж.-Рос. гос. ун-т экономики и сервиса. – № 2004105065/09; заявл. 19.02.2004; опубл. 27.06.2005, Бюл. № 18.