

# ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДЛЯ АДАПТИВНОЙ ЦИФРОВОЙ ФИЛЬТРАЦИИ ШУМОПОДОБНЫХ СИГНАЛОВ НА ФОНЕ ФЛУКТУАЦИОННОГО ШУМА И УЗКОПОЛОСНЫХ ПОМЕХ

Зинчук В.М., Сосулин Ю.Г. \*, Лимарев А.Е., Гончарова Е.И.

Федеральный центр ГП Воронежский НИИ связи  
394018, Воронеж, Плехановская 14, тел. (0732) 52-58-22

\* МАИ, 125871, Москва, Волоколамское шоссе 4,  
факультет 4, каф. 401, тел. (095) 158-68-00

**Реферат.** Предлагается пакет программ, предназначенный для моделирования и оценки эффективности алгоритмов адаптивной цифровой фильтрации в системах связи с шумоподобными сигналами (ШПС). Пакет программ позволяет промоделировать работу алгоритмов адаптации, оценить эффективность адаптивного цифрового фильтра в приёмнике ШПС, а также ускорить процесс отладки алгоритмов адаптации при их реализации на микропроцессорах семейства TMS 320. Пакет реализован в Turbo Pascal 7.0 и Delphi 4.0.

## ВВЕДЕНИЕ

В современных радиотехнических системах (радиосвязи, радиолокации, радионавигации) широкое применение получили сложные шумоподобные сигналы (ШПС). Приём ШПС, как правило, осуществляется на фоне комплекса помех: флукуационного шума (белый гауссовский шум - БГШ), узкополосных, импульсных помех и др. Методы приёма информации при наличии помех разнообразны и приведены в [1-2]. Концептуальные вопросы обработки сигналов с расширением спектра описаны в фундаментальных монографиях [3,4]. В работах [5,6] приведён анализ влияния узкополосных помех (УП) на качество приёма сигналов с фазовой манипуляцией (ФМн), результаты которого позволяют сделать заключение, что задача подавления УП при приёме ШПС является актуальной.

Режекция УП в системах связи с ШПС может быть осуществлена различными устройствами, например, аналоговыми полосовыми фильтрами [7], устройствами, осуществляющими режекцию в спектральной области с применением прямого и обратного преобразования Фурье, адаптивными цифровыми фильтрами (АЦФ) [8].

В связи с практической важностью задачи подавления УП авторами разработан пакет программ, предназначенный для моделирования работы и анализа эффективности АЦФ при приеме ШПС на фоне УП и БГШ в приёмнике ШПС [8].

АЦФ ШПС основана на идее предсказания УП по входному процессу (ВП), состоящему из аддитивной смеси ШПС, УП и БГШ. Учитывая, что корреляционная функция ШПС много уже корреляционной функции УП, то, выбирая частоту отсчетов со скоростью следования элементарных импульсов ШПС, получим, что в выборках составляющие сигнала будут слабо коррелированы, а составляющие УП сильно коррелированы. Указанное различие корреляционных свойств ШПС и УП позволяет прогнозировать УП, а затем вычитать их из ВП.

Технически данные процедуры осуществляются АЦФ. В процессе адаптации формируется амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) фильтра так, что на частотах, соответствующих УП, образуются глубокие провалы, что позволяет частично удалить УП из ВП. После режекции УП аддитивная смесь полезного сигнала и шума подвергается корреляционной обработке.

АЦФ состоит из программируемого фильтра и алгоритма адаптации. Рассматриваются два основных типа программируемых фильтров: фильтры с конечной импульсной характеристикой на линии задержки с отводами и фильтры решетчатой структуры [8].

Алгоритмы адаптации и методы анализа эффективности АЦФ в приёмнике ШПС базируются на мировых и отечественных разработках [8]. Для написания программ генерации сигналов использовались результаты изложенные в [10-13].

**1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ПАКЕТА**

Пакет программ реализован в двух вариантах: первый - на языке программирования Turbo Pascal 7.0, второй - в объектно-ориентированной среде программирования Delphi 4.0. Пакет программ содержит:

- программу, моделирующую ВП, представляющий собой аддитивную смесь полезного шумоподобного сигнала, БГШ и УП;
- программу, моделирующую работу алгоритмов адаптации КИХ-фильтров на линии задержки с отводами и фильтров решетчатой структуры;
- программу анализа эффективности АЦФ;
- программу, которая включает в себя:
  - сервисные программы для отладки алгоритмов адаптации при их реализации на микропроцессорах семейства TMS320;
  - программу, реализующую алгоритм адаптации, написанную на языке ассемблера одной из версий микропроцессора TMS320;
  - программу - симулятор данной версии микропроцессора;
  - программу расчета влияния шумов квантования ВП и параметров фильтра на качество АЦФ.

Для того, чтобы частотные характеристики различных фильтров было легче сравнивать друг с другом частоту  $\omega = 2\pi f$  (где  $f$  - частота в Гц) нормируют, поэтому  $f$  следует выбирать из промежутка  $[0;0,5]$ .

На параметры, используемые при расчётах, накладываются ограничения, которые определяются параметрами компьютера и могут быть легко изменены в зависимости от технических характеристик ЭВМ. Результаты работы программ записываются в файлы и по желанию пользователя выводятся на экран в виде графиков.

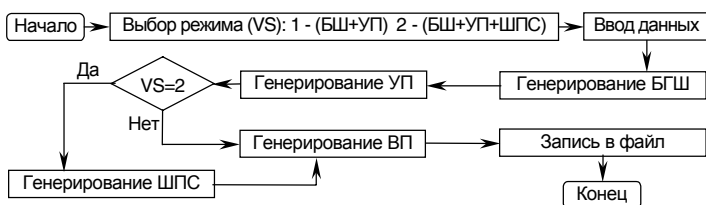


Рис. 1

**2. ПРОГРАММА МОДЕЛИРОВАНИЯ ВХОДНОГО ПРОЦЕССА**

Программа предназначена для моделирования ВП  $x(t)$ , представляющего собой аддитивную смесь полезного ШПС  $s(t)$ , УП  $J(t)$  и БГШ  $n(t)$ . На рис. 1 изображена укрупненная блок-схема функционирования программы. Программа работает в двух режимах: ВП  $x(t) = J(t) + n(t)$ , ВП  $x(t) = s(t) + J(t) + n(t)$ .

**3. ПРОГРАММА МОДЕЛИРОВАНИЯ АЛГОРИТМОВ АДАПТАЦИИ И РАСЧЕТА ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК АДАПТИВНЫХ ЦИФРОВЫХ ФИЛЬТРОВ**

Программа предназначена для генерации ВП, расчета спектральной мощности ( $S(f)$ ) ВП, расчета весовых коэффициентов (ВК) КИХ-фильтров, реализованных на линии задержки с отводами и коэффициентов отражения для фильтров решетчатой структуры, построения частотных характеристик: амплитудно-частотной (АЧХ) и фазово-частотной (ФЧХ) для КИХ-фильтров и предсказывающей ветви фильтра решетчатой структуры. На рис. 2 представлена блок-схема работы программы.

В программу включены следующие алгоритмы адаптации для КИХ-фильтров: наименьших средних квадратов (НСК), Левинсона, Берга, алгоритм Берга с рекуррентным пересчетом знаменателя; для фильтров решетчатой структуры: градиентный алгоритм (ГАРС) и рекуррентный алгоритм наименьших квадратов (РАНКС).

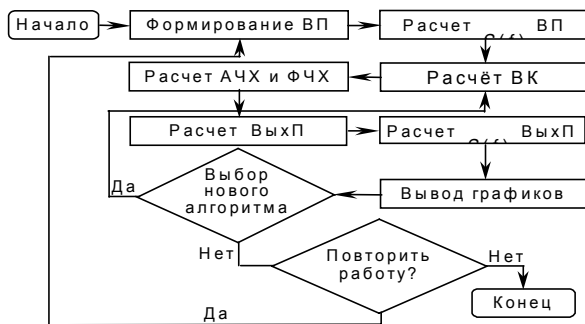
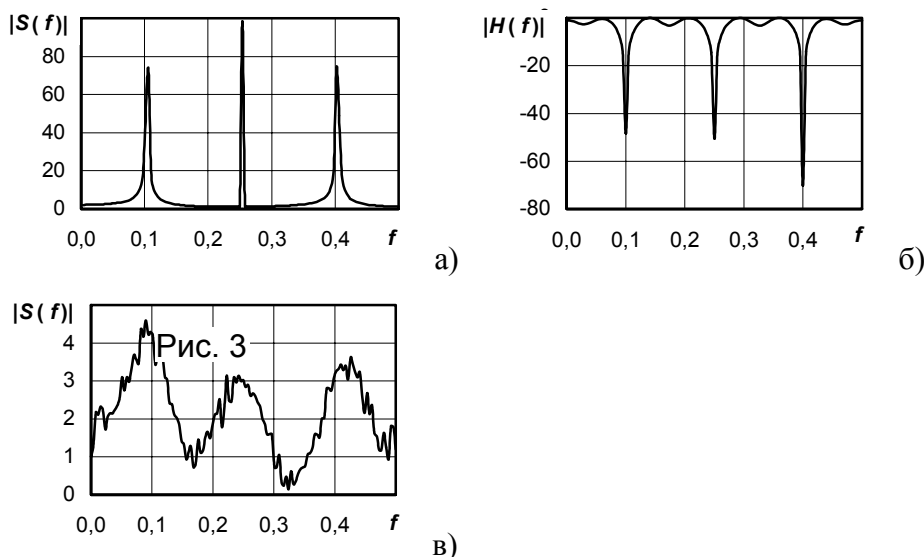


Рис. 2



На рис. 3,а представлен график  $S(f)$  ВП, на рис. 3,б изображён график АЧХ АЦФ, на рис. 3,в показан график  $S(f)$  ВыхП. Данные результаты получены при следующих параметрах: число УП равно трём, помехи передаются на частотах  $f_1=0,1$ ;  $f_2=0,25$ ;  $f_3=0,4$ , с амплитудами  $A_1=A_2=A_3=81,65$ . В качестве расширяющей спектр последовательности используется М-последовательность 8-го прядка с коэффициентом расширения спектра  $L=2^8-1=255$ . При этом отношение сигнал-помеха на один чип  $SNR_c=-40$  дБ. В качестве алгоритма адаптации был выбран алгоритм наименьших средних квадратов (НСК), при адаптации использовалось 256 отсчётов ВП.

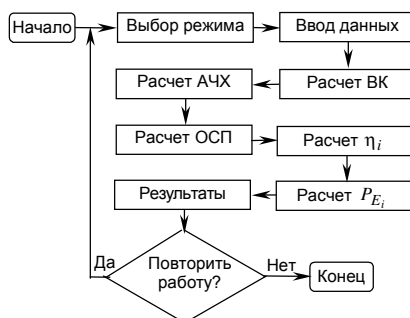


Рис. 4

#### 4. ПРОГРАММА АНАЛИЗА ЭФФЕКТИВНОСТИ АДАПТИВНЫХ ЦИФРОВЫХ ФИЛЬТРОВ

Программа предназначена для анализа потенциальной эффективности применения АЦФ в приемнике ШПС. В качестве критериев оценки эффективности используется коэффициент выигрыша  $\eta$  в отношении сигнал-помеха (ОСП) от применения одностороннего и двустороннего фильтров [8], а также средняя вероятность ошибки на бит информации  $P_E$ , которые рассчитываются в зависимости от расположения УП в спектре сигнала, их мощности и других характеристик. На рис. 4 изображена блок-схема работы программы. На рис. 5,а изображены графики коэффициента выигрыша от применения одностороннего фильтра (кривая  $i=1$ ) и двустороннего фильтра (кривая  $i=2$ ) в дБ, а на рис. 5,б графики вероятности ошибки на бит (кривая  $i=0$ , в случае отсутствия фильтра, кривая  $i=1$  при применении одностороннего фильтра, кривая  $i=2$  при применении двустороннего фильтра) в зависимости от отношения сигнал-узкополосная помеха  $S/J$  в дБ.

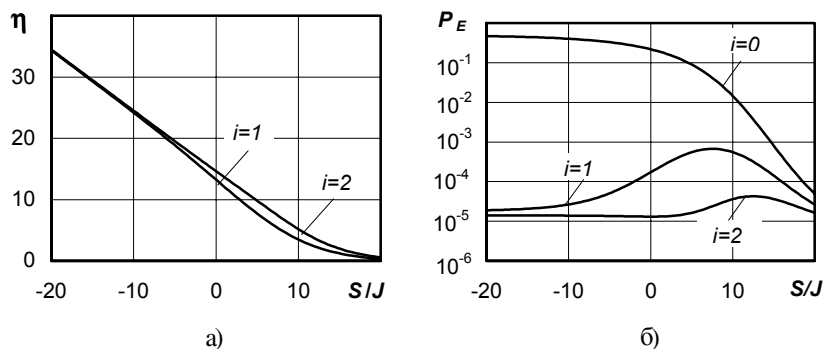


Рис. 5

### 5. ПРОГРАММА РАСЧЕТА ВЛИЯНИЯ ШУМОВ КВАНТОВАНИЯ ВХОДНОГО ПРОЦЕССА И ПАРАМЕТРОВ ФИЛЬТРА НА КАЧЕСТВО АДАПТИВНОЙ ЦИФРОВОЙ ФИЛЬТРАЦИИ

Программа предназначена для оценки вклада шумов квантования в избыточное значение среднего квадрата ошибки (СКО) следующих величин: минимальной ошибки прогноза УП, шума квантования ВП, шума квантования отклика фильтра, шума квантования ВК фильтра. Блок-схема работы программы представлена на рис. 6. В результате работы программы строятся зависимости вклада шумов квантования: остаточной ошибки (кривая 1), входного сигнала (кривая 2), отклика фильтра (кривая 3), за счёт шума градиента (кривая 4), за счёт запаздывания весовых коэффициентов (кривая 5), общего шума весовых коэффициентов (кривая 6), результирующего (кривая 7) от частоты расположения синусоидальной помехи рис. 7,а и параметра сходимости алгоритма адаптации  $\mu$  рис. 7,б.

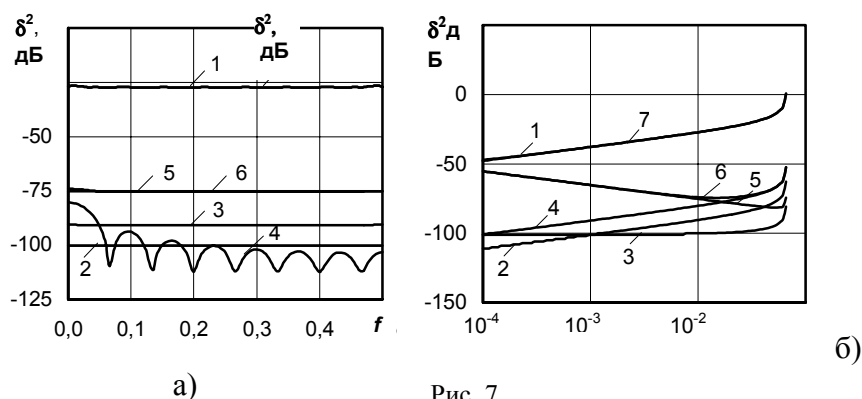


Рис. 7

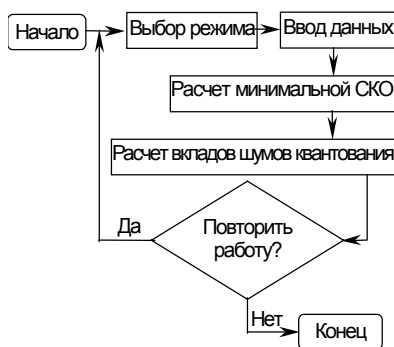


Рис. 6

**6. СЕРВИСНЫЕ ПРОГРАММЫ ДЛЯ ОТЛАДКИ АЛГОРИТМОВ АДАПТАЦИИ ПРИ ИХ РЕАЛИЗАЦИИ НА МИКРОПРОЦЕССОРАХ СЕМЕЙСТВА TMS320**

Микропроцессорная реализация АЦФ включает в себя аналого-цифровой и цифро-аналоговый интерфейс, микропроцессор цифровой обработки сигналов и программу на языке ассемблера микропроцессора, реализующую алгоритм адаптации. Для отладки ассемблеровских программ микропроцессора семейства TMS 320 фирмой Texas Instrument разработаны стандартные отладочные средства. Однако данных средств недостаточно для отладки ассемблеровских программ, реализующих алгоритм адаптации и цифровой фильтр. Поэтому дополнительно к стандартному отладочному комплексу добавлен ряд сервисных программных модулей, объединенных в одну систему.

Главная программа с именем TMS, реализует связь всех программных модулей в единый программный комплекс и осуществляет диалог с пользователем. На рис. 8 изображена укрупненная блок-схема функционирования данной программы.

В процессе работы программа TMS запускает симулятор - программную модель микропроцессора семейства TMS 320 Симулятор (программа SIM) использует:

- загрузочный модуль программы, реализующей на языке ассемблера АЦФ: алгоритм адаптации НСК и фильтр на линии задержки с отводами (программа LMS.ASM);

- ВП для фильтра, представленный в виде файла данных в 16-й системе счисления.

Программа TMS легко адаптируется к различным версиям симуляторов микропроцессоров семейства TMS 320 с использованием ассемблеровских программ для микропроцессоров данной версии.

В качестве примера рассматривался случай, когда на вход приёмного устройства поступает ВП, представляющий аддитивную смесь БГШ, трех УП с частотами  $f_1=0,1$ ;  $f_2=0,25$ ;  $f_3=0,4$  и одинаковыми амплитудами  $A_1=A_2=A_3=81,65$ , ШПС, реализованного в виде М-последовательность 8-го порядка с коэффициентом расширения спектра  $L=2^8-1=255$ . Результаты аналогичны графикам изображённым полученные в ходе выполнения программы, очень близки к графикам, которые изображены на рис. 3.

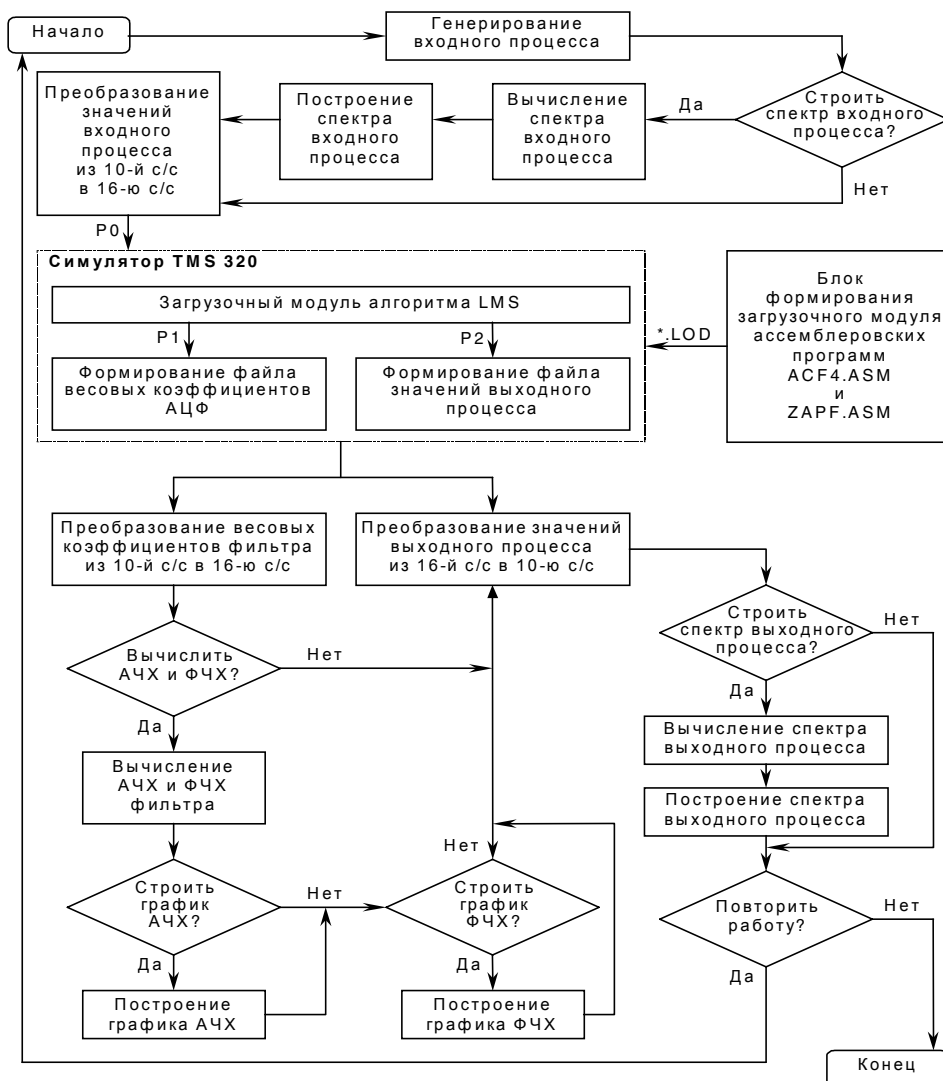


Рис. 8

## 7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В целом предлагаемый пакет программ позволяет промоделировать работу АЦФ, оценить его эффективность в приёмнике ШПС по двум критериям: коэффициенту выигрыша в ОСП и средней вероятности ошибки на бит, а также ускорить процесс отладки ассемблеровских программ на языке ассемблера одной из версий микропроцессора семейства TMS 320. Выбор среды Delphi-4.0 позволяет реализовать удобный для пользователя интерфейс и ускорить процесс обработки данных.

### Библиография

1. Финк Л. М. Теория передачи дискретных сообщений. - М.: Сов. радио, 1970. - 728 с.
2. Зюко А.Г. Помехоустойчивость и эффективность систем связи. - М.: Связь, 1972, 360 с.
3. Holmes Jack K. Coherent spread spectrum systems. - New York: John Wiley & Sons, Inc., 1982. - 624 p.
4. Simon M.K., Omura J.K., Scholtz R. A., Levitt B.K. Spread spectrum communication, Volume I-III. - Rockville, MD: Computer Science Press, 1985.
5. Rosenbaum A. S. Binary PSK Error Probabilities with Multiple Cochanel Interferences. - IEEE Trans., vol. COM-18, № 3, June 1970, p.241-253.
6. Prabhu V.K. Error Rate Considerations for Coherent Phase-Shift Keyed Systems with Co-Channel Interference. - The Bell System Technical Journal, March 1969, p. 743-767.
7. Помехозащищённость радиосистем со сложными сигналами. Тузов Г.И., Сивов В.А., Прытков В.И. и др.: Под ред. Тузова Г.И. - М.: Радио и связь, 1985, 264 с.
8. Зинчук В.М., Сосулин Ю.Г., Лимарев А.Е., Мухин Н.П. Адаптивная цифровая фильтрация шумоподобных сигналов в радиотехнических системах. - Цифровая обработка сигналов, 2000, № 1, - с. 4-18.
9. Адаптивные фильтры. Под ред. К.Ф.Н. Коуэна и П.М. Гранта: Пер. с англ./ Под ред. С.М. Ряковского. - М.: Мир, 1988, - 392с.
10. Варакин Л.Е. Теория сложных сигналов. - М.: Сов. Радио, 1970, - 376 с.
11. Варакин Л.Е. Системы связи с шумоподобными сигналами. - М.: Радио и связь, 1985, - 384 с.
12. Шумоподобные сигналы в системах передачи информации. Под ред. проф. В.Б. Пестрякова. - М., Сов. радио, 1973, 424с.
13. Pickholtz R.L., Schilling D.L., Milstein L.B. Theory of spread-spectrum communications. - IEEE Trans. Commun. Vol. COM-30, May 1982, p. 855-884.



**SOFTWARE FOR ADAPTIVE DIGITAL FILTERING SPREAD-SPECTRUM SIGNALS IN THE BACKGROUND OF FLUCTUATION NOISE AND NARROW-BAND INTERFERENCE**

Zinchuk V.M., Sosulin Yu.G., Limarev A.Ye., Goncharova Ye.I.

Federal Centre State Enterprise  
„Voronezh Scientific Research Institute of Communication“  
Plekhanovskaya str. 14, Voronezh, Russia, 394018, phone: (0732) 52-58-22  
MAI, Faculty 4, Department 401  
Volokolamskoe sh. 4, Moscow, Russia, 125871, phone: (095) 158-68-00

**Abstract.** Software package intended for simulation and estimation of algorithms efficiency for adaptive digital filtering spread-spectrum (SS) signals in communication systems is proposed. The software package allows to simulate adaptation algorithm operation, to estimate the efficiency of adaptive digital filter in SS receiver and also to speed up the adaptation algorithms debugging process under its realization on the basis of microprocessors of the family TMS 320. The package is realized in Turbo Pascal 7.0 and Delphi 4.0.

Composite spread-spectrum (SS) signals have found wide use in modern radioengineering systems (in the fields of radiocommunication, radar, radionavigation). As a rule, SS-signal reception is carrying out in the background of complex interference: fluctuation noise (white Gaussian noise - WGN), narrow-band interference, impulse noise, etc. Data reception techniques under interference conditions are different and described in [1-2]. Conceptual problems of spread-spectrum signal processing are represented in the fundamental monographs [3,4]. The analysis of narrow-band interference (NBI) effects on phase-shift keying (PSK) signal reception quality is given in [5,6]. The results of this analysis allow to come to the conclusion that the problem of NBI suppression at the time of SS-signal reception is urgent.

NBI rejection in SS communication system can be performed by various devices such as analog band-pass filter [7], devices for rejection in the spectrum region with using direct and inverse Fourier transform, adaptive digital filters (ADF) [8,9].

In connection with practical importance of NBI suppression the authors have built the software package intended for simulating the operation and analysis of ADF efficiency at the time of SS- signals reception in the background of NBI and WGN [8].

Adaptive digital filtering is based on the idea of NBI prediction in response to input process composed of additive mixture of SS-signals, NBI and WGN. Since the SS-signal correlation function is more narrower than the NBI one, sample signal components will be weak correlated and NBI components will be highly correlated when sampling rate is equal to SS pulse repetition rate.

Indicated difference in SS-signal and NBI correlations allows to predict NBI and then to withdraw them from the input process.

Technically these procedures are implemented by ADF. In the process of adaptation at the filter frequency-response (curve) deep notches are formed in the places of NBI components that allows partially to withdraw NBI from the input process. After NBI rejection, the additive mixture of desired signal and noise is subjected to correlation processing.

ADF consists of programmed filter and adaptation algorithm circuit. Two types of programmed filters are considered: finite-duration impulse-response (FIR) filter in the tapped delay line and a lattice filter [8].

The software package is realized in two versions: the first one - in Turbo Pascal, the second one - in object-oriented language Delphi 4.0 and consists of:

- input process simulation program;
- simulation program for FIR and lattice filters adaptation algorithms. On the basis of input process, weights of FIR filter in tapped delay line and lattice filter reflection factors are calculated. We use the following adaptation algorithms:
  - least squares algorithm;
  - Levinson algorithm based on input process sampling;
  - Levinson algorithm based on accurate value of correlation function;
  - Burg's algorithm;
  - Burg's algorithm with the recursive recalculation of the denominator;
  - gradient algorithm for lattice filters;
  - recurrent least squares algorithm for lattice filters;
- program for ADF efficiency analysis. Mean probability of error per bit and gain in signal-to-noise ratio (SNR) are used as criteria for efficiency estimation. The designed software is intended for per-bit error probability and gain in SNR calculation depending on location of NBI in signal spectrum, their power and other signal and noise characteristics;
- program which includes:
  - service debugging routine for realizing adaptive algorithms on microprocessors of the family TMS 320;
  - routine for adaptation algorithms realization in assembler language of one of microprocessor TMS 320;
  - software simulator of this microprocessor version;

- program for calculating effects of input process sampling noise and filter parameters on the adaptive digital filtering quality.

The constraints defined by computer parameters and changed depending on computer engineering characteristics are imposed on design parameters. Program operation results are in the files and in accordance with user's desire may be displayed as graphics.

As a whole the proposed software package allows to simulate the adaptive digital filter functioning, to estimate its efficiency in SS receiver and to speed up the process of realization in microprocessors of the family TMS 320.

Adaptation algorithms and efficiency analysis techniques for ADF in SS receiver are based on home and abroad developments [8]. For signal generation program composition the results stated in [10-13] are used.

#### References

1. Fink L.M. Theory of Discrete Data Transmission. - Moscow: Sov. Radio, 1970, (In Russian)
2. Zyuko A.G. Jamming-Resistance and Communication Systems Efficiency. - Moscow: Svyaz, 1972, (In Russian)
3. Holmes Jack K. Coherent spread spectrum systems. - New York: John Wiley & Sons, Inc., 1982. - 624p.
4. Simon M.K., Omura J.K., Scholtz R. A., Levitt B.K. Spread spectrum communication, Volume I-III. - Rockville, MD: Computer Science Press, 1985.
5. Rosenbaum A. S. Binary PSK Error Probabilities with Multiple Cochannel Interferences. - IEEE Trans., vol. COM-18, 3, June 1970, p. 241-253.
6. Prabhu V.K. Error Rate Considerations for Coherent Phase-Shift Keyed Systems with Co-Channel Interference. - The Bell System Technical Journal, March 1969, p. 743-767.
7. Tuzov G.I., Sivov V.A., Pritkov V.I. et al. ECM-Resistance of Communication Systems with Complex Signals /Under edition of G.I. Tuzov. - Moscow: Radio i Svyaz, 1985, (In Russian)
8. Zinchuk V.M., Sosulin Yu.G., Limarev A.Ye., Mukhin N.P. Adaptive Digital SS Signals Filtering in Radioengineering Systems-Tsifrovaya Obrabotka Signalov, 1, 2000, p. 4-18, (In Russian)
9. Adaptive Filters /Under edition of Kohen K.F.N. and Grant P.M. Translation from English / Under edition of Ryakovskiy S.M. - Moscow: Mir, 1988. - 392 p., (In Russian)
10. Varakin L.Ye. Complex Signals Theory. - Moscow: Sov. Radio, 1970. - 376 p., (In Russian)
11. Varakin L.Ye. SS Communication Systems. - Moscow: Radio i Svyaz, 1985. - 384 p., (In Russian)
12. Spread-Spectrum Signals in data Transmission Systems /Under Edition of Prof. Pestryakov V.B. - Moscow: Sov. Radio, 1973. - 424 p., (In Russian)
13. Pickholtz R.L., Schilling D.L., Milstein L.B. Theory of spread-spectrum communications. - IEEE Trans. Commun. vol. COM-30, May 1982, p. 855-884.