

СИНТЕЗ АЛГОРИТМА ПРИЕМА СИГНАЛА НА ФОНЕ КОМПЛЕКСНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ ПОМЕХ

В.И. Сединин, А.В. Микушин, К.А. Быков

*Кафедра «Система автоматизированного проектирования»,
ГОУ ВПО «Сибирский государственный университет телекоммуникаций
и информатики», г. Новосибирск; sedvi@bk.ru*

Представлена членом редколлегии профессором В.И. Коноваловым

Ключевые слова и фразы: помехи; прием сигнала; фильтрация; шум.

Аннотация: Приведена модель помеховой обстановки в мобильных системах радиосвязи, на основе которой синтезируется адаптивный алгоритм приема сигналов с подавлением комплекса различных типов помех. В качестве метода подавления помех использована цифровая фильтрация. Представлены результаты моделирования цифрового фильтра подавления помех.

Введение

Рассматривая помехи, действующие в каналах мобильной радиосвязи, можно выделить три основных вида помех сосредоточенных:

- по спектру (узкополосные);
- времени (импульсные);
- пространству (структурно-подобные).

Существует большое количество работ, посвященных проблеме повышения помехоустойчивости систем связи за счет подавления одного из представленных видов помех, однако, в реальных радиоканалах действует, как правило, комплекс различных видов помех. В этом случае существующие методы подавления помех теряют свою эффективность. Более того, на сегодняшний момент не существует единой теории оптимального подавления одновременно нескольких видов помех.

Наиболее перспективным направлением решения проблемы защиты мобильных систем радиосвязи от комплекса помех можно рассматривать разработку цифровых адаптивных алгоритмов приема сигнала с подавлением помех на основе цифровой обеливающей фильтрации [1, 2]. В работе [1] были предложены основополагающие принципы построения адаптивных алгоритмов приема сигнала в условиях воздействия комплекса различных типов помех. Однако анализ результатов работы авторов указывает на то, что наиболее серьезные проблемы возникают в ходе реализации предложенных алгоритмов в системах радиосвязи, в которых присутствуют различные типы помех с изначально неизвестными параметрами.

Рассмотрим метод реализации адаптивных алгоритмов приема сигнала с использованием обеливающих фильтров, предназначенных для одновременного подавления помех, сосредоточенных не только по спектру, но и по времени и пространству.

Постановка задачи

Предполагается, что с антенной системы размерности $M \times N$ снимается $M \times N$ -мерный сигнал, реализации которого на выходе каждого элемента антенной системы не скоррелированы между собой. Этот сигнал можно записать в виде многомерного комплексного вектора

$$\dot{X}(t) = \begin{pmatrix} \dot{x}_{11}(t), \dot{x}_{12}(t), \dots, \dot{x}_{1N}(t) \\ \dot{x}_{21}(t), \dot{x}_{22}(t), \dots, \dot{x}_{2N}(t) \\ \dots \\ \dot{x}_{M1}(t), \dot{x}_{M1}(t), \dots, \dot{x}_{MN}(t) \end{pmatrix}. \quad (1)$$

Исходный сигнал (1), полученный с антенной системы, описывается матричным выражением

$$\dot{X}(t) = \dot{A}\dot{U}_r(t, \alpha_r) + \dot{n}(t, \nu), \quad (2)$$

где $r = 1, \dots, R$; $\dot{U}_r(t, \alpha_r)$ – r -й вариант передаваемого полезного сигнала; \dot{A} – многомерная матрица, описывающая канал передачи; $\dot{n}(t, \nu)$ – многомерная матрица, описывающая совокупность помех.

Совокупность помех описывается многомерной матрицей $\dot{n}(t, \nu)$ выборочных значений. Параметры совокупности помех ν определяются по обучающей выборке принимаемого сигнала $\dot{X}(t)$. Будем считать, что совокупность помех ν распределена по гауссовскому (нормальному) закону [1].

Реализации помех в общем случае являются нестационарными. Различные элементы выборки n_m и n_k могут быть взаимозависимы так, что их центрированный корреляционный момент в общем случае не равен нулю. Степень взаимной корреляции характеризуется коэффициентом корреляции элементов совокупности помех

$$\rho_{mn} = \frac{M(n_m n_n)}{\sigma_m \sigma_n}. \quad (3)$$

Совокупность корреляционных моментов элементов помех образует корреляционную матрицу

$$\Phi = \|\|\Phi_{mn}\|\| = \|\|\rho_{mn}\sigma_m\sigma_n\|\|. \quad (4)$$

Зная определитель корреляционной матрицы Φ и матрицу Φ^{-1} , обратную корреляционной, можно найти плотность вероятности гауссовского (нормального) закона распределения многомерной матрицы входных сигналов:

$$W(X) = (2\pi)^{\frac{-mk}{2}} [\det(\Phi)]^{-\frac{1}{2}} e^{-\left(\frac{X^T \Phi^{-1} X}{2}\right)} \quad (5)$$

и совокупности помех

$$W(n) = (2\pi)^{-\frac{mk}{2}} [\det(\varphi)]^{-\frac{1}{2}} e^{-\left(\frac{n^T \varphi^{-1} n}{2}\right)}, \quad (6)$$

где матричное произведение в аргументе экспоненты определяется как

$$X^T \varphi^{-1} X = \sum_{m=1}^M \sum_{k=1}^K \varphi_{mk}^{-1} x_m x_k. \quad (7)$$

Запишем полученное соотношение для случая, когда приемные антенны «вытянуты» в одну линию. Корреляционная матрица в этом случае содержит два элемента

$$\varphi = \begin{vmatrix} \sigma_m^2 & \sigma_m \sigma_k \rho \\ \sigma_m \sigma_k \rho & \sigma_k^2 \end{vmatrix}, \quad (8)$$

а ее определитель определяется выражением $\det(\varphi) = \sigma_m^2 \sigma_k^2 (1 - \rho^2)$.

Обратная корреляционная матрица при этом записывается в виде

$$\begin{aligned} \varphi^{-1} &= \frac{1}{\sigma_m^2 \sigma_k^2 (1 - \rho^2)} \begin{vmatrix} \sigma_k^2 & -\sigma_m \sigma_k \rho \\ -\sigma_m \sigma_k \rho & \sigma_m^2 \end{vmatrix} = \\ &= \frac{1}{\sigma_m^2 \sigma_k^2 (1 - \rho^2)} \begin{vmatrix} \frac{1}{\sigma_m^2} & \frac{-\rho}{\sigma_m \sigma_k} \\ \frac{-\rho}{\sigma_m \sigma_k} & \frac{1}{\sigma_k^2} \end{vmatrix}. \end{aligned} \quad (9)$$

Тогда плотность вероятности распределения многомерной матрицы входных сигналов приобретает вид

$$W(X) = \frac{1}{2\pi \sigma_m \sigma_k \sqrt{1 - \rho^2}} e^{-\frac{1}{2(1 - \rho^2)} \left[\frac{X_m^2}{\sigma_m^2} - 2\rho \frac{X_m X_k}{\sigma_m \sigma_k} + \frac{X_k^2}{\sigma_k^2} \right]}. \quad (10)$$

Синтез алгоритма приема сигналов на фоне помех

Пусть на вход решающего устройства приемника системы цифровой радиосвязи поступает сигнал, описываемый выражением (2). По этому сигналу требуется за время, равное длительности наблюдения T , определить принимаемый полезный сигнал U , так, чтобы потери от принятия ошибочного решения были минимально возможными в соответствии с выбранным критерием оптимальности.

В качестве правила решения применим критерий идеального наблюдателя Котельникова.

При наличии полезного сигнала многомерная матрица входных сигналов определяется выражением $X = U + n$, из которого можно выразить совокупность помех $n = X - U$, и записать

$$W(X) = W(X - n). \quad (11)$$

Используя выражения (9) и (11), получим

$$\begin{aligned} \ln(\Lambda(X)) &= \frac{(X-U_r)^T \Phi^{-1}(X-U_r)}{2} - \\ &\quad - \frac{(X-U_l)^T \Phi^{-1}(X-U_l)}{2} = \\ &= X^T \Phi^{-1} U_r - X^T \Phi^{-1} U_l - \frac{U_r^T \Phi^{-1} U_r}{2} + \frac{U_l^T \Phi^{-1} U_l}{2} > 0. \end{aligned} \quad (12)$$

Последние две составляющие выражения (12) представляют собой энергию r -го и l -го вариантов переданного сигнала, которые в общем случае могут быть не равны. Перепишем выражение (12) в следующем виде

$$\ln(\Lambda(X)) = \left(\varsigma_r - \frac{q_r^2}{2} \right) - \left(\varsigma_l - \frac{q_l^2}{2} \right), \quad (13)$$

где $\varsigma = X^T \Phi^{-1} Y$, $q^2 = X^T \Phi^{-1} X$.

Окончательно алгоритм приема сигналов может быть записан в следующем виде

$$\varsigma_r - \frac{q_r^2}{2} > \varsigma_l - \frac{q_l^2}{2}. \quad (14)$$

Из этой формулы для детерминированных сигналов следует известный алгоритм когерентного приема [1]

$$\sum_{i=1}^N [(\dot{X}_i - \hat{n}_{ri}) \dot{U}_{ri}^*]^2 > \sum_{i=1}^N [(\dot{X}_i - \hat{n}_{li}) \dot{U}_{li}^*]^2, \quad r \neq l. \quad (15)$$

Особенностью алгоритмов (14) и (15) является процедура вычитания из принятого сигнала оценки совокупности помех $\hat{n}(t, \hat{v})$, что эквивалентно обратной пропорциональности автокорреляционной функции совокупности помех, однако, в данной постановке задачи автокорреляционная функция помех априорно неизвестна, поэтому для ее определения воспользуемся процедурой обучения по выборке входного сигнала. В большинстве работ эта процедура применяется во временной области [3]. Процедуру обучения по выборке входного сигнала применим в частотной области. Для этого воспользуемся известным уравнением преобразования Фурье для корреляционной функции входного сигнала [4]

$$TF(R) = G(f), \quad (16)$$

где TF – прямое преобразование Фурье; R – функция автокорреляции входного сигнала; $G(f)$ – энергетический спектр входного сигнала.

С другой стороны, энергетический спектр входного сигнала можно вычислить, воспользовавшись преобразованием Гильберта

$$G(f) = E\{TF[X^T(t)]TF[X(t)]\}. \quad (17)$$

Учитывая приведенные выше соображения, перепишем случайную величину ς из (13) в следующем виде

$$\varsigma = TF[X^T] \frac{1}{E\{TF[X^T]TF[X]\}} TF[U_r]. \quad (18)$$

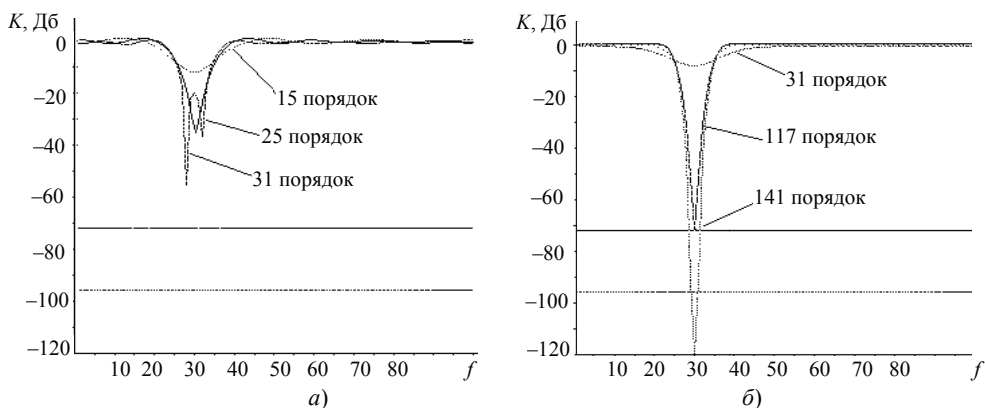


Рис. 2. Графики зависимости затухания (K) от частоты (f , % от частоты Котельникова) амплитудно-частотных характеристик обесцвечивающих фильтров:
a – без применения сглаживающего окна;
б – с применением сглаживающего окна Блэкмана

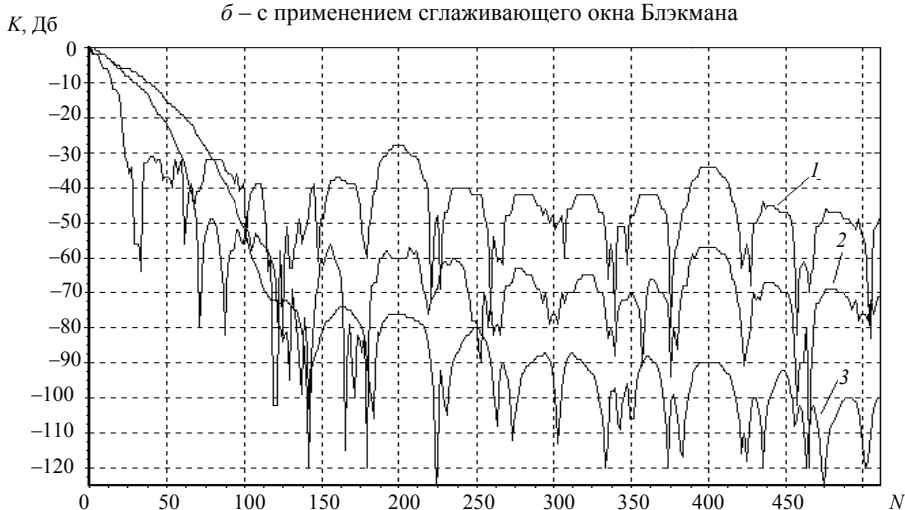


Рис. 3. График степени подавления (K) обесцвечивающего фильтра в зависимости от порядка (N) фильтра:
1 – прямоугольное окно; *2* – окно Хемминга; *3* – окно Блэкмана

В заключение следует отметить, что предложенные адаптивные алгоритмы подавления помех позволяют решить задачу защиты систем мобильной радиосвязи от многолучевого распространения радиоволн в условиях городской застройки. Что имеет существенное значение для сотовых систем связи.

Список литературы

1. Сединин, В.И. Защита от помех в системах мобильной радиосвязи / В.И. Сединин, А.И. Фалько. – М. : Связь, 1998. – 182 с.
2. Уидроу, Б. Компенсация помех. Принципы построения и применения / Б. Уидроу // Тр. ин-та инженеров по электротехнике и радиоэлектронике. – 1975. – № 12. – С. 69–97.
3. Адаптивные фильтры : пер. с англ. / под ред. К.Ф.Н. Коуэна, П.М. Гранта. – М. : Мир, 1988. – 392 с.
4. Тихонов, В.И. Статистическая радиотехника / В.И. Тихонов. – М. : Радио и связь, 1982. – 624 с.
5. Репин, В.Г. Статистический синтез при априорной неопределенности и адаптация информационных систем / В.Г. Репин, Г.П. Тартаковский. – М. : Сов. радио, 1977. – 432 с.

Algorithm Synthesis of Signal Reception at the Background of Complex Influence of Various Types of Noises

V.I. Sedinin, A.V. Mikushin, K.A. Bykov

*Department "Computer Aided Design Systems",
Siberian State University of Telecommunications and Computer Science,
Novosibirsk; sedvi@bk.ru*

Key words and phrases: noise; noise waves; filtering; signal reception.

Abstract The paper presents the model of noise conditions in mobile radio systems, on the basis of which the adaptive algorithm for signal reception with suppression of the complex of various types of noise is synthesized. Digital filtering is used as a method of noise suppression. The results of modeling a digital noise filter are given.

Synthese des Algorithmus des Signalempfanges auf Grund der Komplexeinwirkung der verschiedenen Störungstypen

Zusammenfassung: Es wird das Modell der Störungssituation in den Mobilsystemen der Funkverbindung angeführt, auf dessen Grund der adaptiven Algorithmus des Signalempfanges mit der Unterdrückung des Komplexes der verschiedenen Störungstypen syntesiert wird. Als Methode der Störungsunterdrückung wird die Ziffernfiltrierung benutzt. Es werden die Resultate der Modellierung des Ziffernfilters der Störungsunterdrückung angeführt.

Synthèse de l'algorithme de la réception du signal sur le fond de l'action complexe de différents types des erreurs

Résumé: Est cité le modèle de la situation des erreurs dans les systèmes mobiles de la liaison radio à la base de laquelle est synthésé l'algorithme de la réception des signaux avec l'étouffement d'un complexe de différents types des erreurs. En qualité de la méthode de l'étouffement des erreurs est utilisé le filtrage numérique de l'étouffement des erreurs.

Авторы: *Сединин Валерий Иванович* – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Системы автоматизированного проектирования»; *Микушин Александр Владимирович* – кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры «Системы автоматизированного проектирования»; *Быков Константин Александрович* – старший преподаватель кафедры «Системы автоматизированного проектирования», ГОУ ВПО «Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики», г. Новосибирск.

Рецензент: *Пальчун Юрий Анатольевич* – доктор технических наук, профессор кафедры «Передача дискретных сообщений и метрология», ГОУ ВПО «Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики», г. Новосибирск.