

Адаптивная фильтрация неклассифицированных выборок наблюдения

Владимир Бартенев (Москва)

В статье рассмотрен новый способ построения адаптивного фильтра, который позволяет эффективно выделять полезные сигналы от коррелированных помех даже в условиях, когда выборка наблюдений неклассифицирована. Данный способ имеет особое значение при фильтрации полезных сигналов на фоне дискретных коррелированных помех. Предложенный способ иллюстрируется примером фильтрации двухмодовой дискретной коррелированной помехи и полезного сигнала в одном элементе разрешения, при этом помеха эффективно подавляется, а полезный сигнал сохраняется неизменным.

Описываемый способ [1] относится к адаптивной цифровой обработке сигналов. На практике часто возникает задача адаптивной фильтрации полезного сигнала по выборке наблюдений, которая используется для оценки параметров помехи и формирования весовых коэффициентов адаптивного режекторного фильтра и которая содержит полезный сигнал, т.е. выборка не является классифицированной. Предельный случай неклассифицированной выборки – когда помеха и сигнал находятся в одном и том же временном дискрете. В частности, примером такой ситуации может быть фильтрация полезного сигнала на фоне дискретных коррелированных помех, вызванных отражениями от гидрометеоров, стай птиц или роев насекомых в радиолокации. Дополнительной сложностью фильтрации таких дискретных помех является многомодовый характер их спектра флюктуаций, который требует использования адаптивной фильтрации с высоким разрешением в частотной области.

Известен способ адаптивной авторегрессионной фильтрации [2] мешающих отражений, который включает в себя формирование коэффициентов авторегрессии и использование их в качестве весовых коэффициентов для фильтрации. Хотя данный способ характеризуется высокой эффективностью и воз-

можностью режекции помех с многомодовыми спектрами, его использование применительно к неклассифицированной выборке наблюдений наталкивается на большие трудности. Например, если коррелированная помеха является дискретной и занимает один временной дискрет (по дальности), то при наличии полезного сигнала в этом же дискрете сформированные коэффициенты авторегрессии будут учитывать параметры и полезного сигнала, и при фильтрации он будет отфильтрован наряду с помехой. Следовательно, способ, взятый в качестве прототипа, может работать только по классифицированной выборке наблюдений.

Для исключения подавления полезного сигнала при фильтрации неклассифицированной выборки был предложен способ [1], который реализует формирование весовых коэффициентов фильтра, являющихся коэффициентами авторегрессии входной выборки наблюдений, с последующим использованием этих весовых коэффициентов для фильтрации, которой подвергаются две входные выборки наблюдений, отличающиеся или частотой повторения, или несущей частотой. При этом коэффициенты авторегрессии, сформированные по одной выборке наблюдений, используются в качестве весовых коэффициентов для фильтрации другой выборки наблюдений

и наоборот, а результаты фильтрации одной и другой выборок наблюдения используются для дальнейшей обработки. Разнос частот повторения или несущих частот двух выборок наблюдения выбирается так, чтобы разность соответствующих им доплеровских смещений частоты была значительно меньше доплеровских смещений частоты для каждой из выборок наблюдений.

В авторегрессионном фильтре-прототипе фильтрация выборки наблюдений в виде комплексного вектора $\mathbf{z}(n)$ (который может быть представлен своими квадратурными составляющими) осуществляется с помощью нерекурсивного фильтра, у которого комплексные весовые коэффициенты – коэффициенты авторегрессии, т.е.:

$$Y[n] = a_1 z[n] + a_2 z[n-1] + \dots + a_p z[n-p],$$

где p – порядок авторегрессии, определяющий порядок фильтра, a_1, \dots, a_p – оценки коэффициентов авторегрессии, $z[n]$ – n -й отсчет входной выборки наблюдений.

Для неклассифицированной выборки наблюдений главная проблема заключается не в том, как формировать коэффициенты авторегрессии, каким известным алгоритмом следует для этого воспользоваться (Максимальной Энтропии, Берга или Левинсона[3]), а в том, как исключить влияние полезного сигнала на формируемые коэффициенты авторегрессии. Для протяжённой помехи, занимающей много элементов разрешения по дальности, когда оценки коэффициентов авторегрессии формируются с усреднением по этим элементам разрешения, протяжённость коррелированной помехи значительно превышает протяжённость полезного сигнала, что даёт основание считать входную выборку наблюдений классифицированной и позволяет пренебречь влиянием полезного

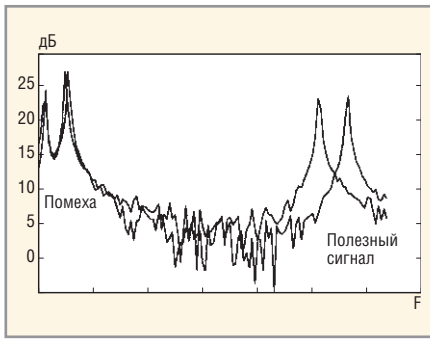


Рис. 1. Спектральное представление сигналов дискретной двухкомпонентной помехи с доплеровскими частотами компонент 10 и 20 Гц и полезного сигнала с доплеровской частотой 200 Гц на входе. Здесь и на рис. 2 – 5 частота F указана с метками через 40 Гц. Две выборки на несущих частотах 500 и 550 МГц

сигнала на коэффициенты авторегрессии.

Если помеха является дискретной и для оценки коэффициентов авторегрессии производится усреднение только по обрабатываемой пачке импульсов, а формируемые коэффициенты авторегрессии учитывают, в том числе, и полезный сигнал, предлагается использовать существенные различия в доплеровской скорости наблюдаемых объектов: медленно движущихся (помеха) и быстро движущихся (полезный сигнал). При этом для обработки предлагается использовать не одну, а две выборки наблюдений, отличающихся или несущей частотой, или частотой повторения. Разницу в несущих частотах или частоте повторения предлагается выбирать так, чтобы коэффициенты авторегрессии для медленно движущейся помехи практически совпадали, а для полезного сигнала – существенно различались. Поэтому если для фильтрации сигналов одной выборки наблюдений использовать коэффициенты авторегрессии другой выборки наблюдений, помеха будет компенсироваться, а полезный сигнал – нет.

Таким образом, предлагаемый алгоритм имеет следующий вид для первой и второй выборок наблюдений:

$$Y1[n] = (a11z2[n] + a12z2[n - 1] + \dots + a1pz2[n - p]),$$

$$Y2[n] = (a21z1[n] + a22z2[n - 1] + \dots + a2pz2[n - p]),$$

где $a11, \dots, a1p$ – оценки коэффициентов авторегрессии первой выборки

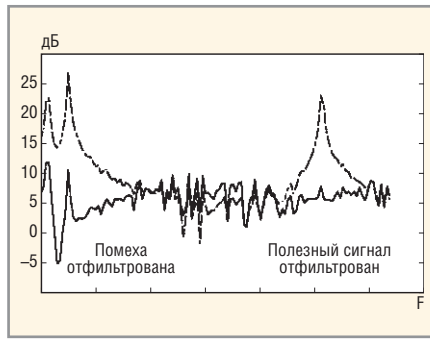


Рис. 2. Спектральное представление сигналов дискретной двухкомпонентной помехи с доплеровскими частотами компонент 10 и 20 Гц и полезного сигнала с доплеровской частотой 200 Гц после фильтрации по способу, соответствующему прототипу. Пунктиром показан спектр сигнала на входе

наблюдений, $z2[n]$ – n -й отсчёт второй входной выборки наблюдений, $a21, \dots, a2p$ – оценки коэффициентов авторегрессии второй выборки наблюдений, $z1[n]$ – n -й отсчёт первой входной выборки наблюдений.

Проиллюстрируем работу предлагаемого способа на конкретных примерах, прибегнув к моделированию с помощью системы MATLAB. Осуществим фильтрацию двух выборок наблюдений на несущих частотах 500 и 550 МГц с постоянным периодом повторения 0,001 с. Зададим параметры полезного сигнала и двухкомпонентной помехи для каждой выборки наблюдений. Листинг программы приведён на сайте журнала.

Следует отметить, что для формирования коэффициентов авторегрессии, кроме метода максимальной энтропии (функция `rmet` в MATLAB), были также испытаны метод Берга (функция `rburg` в MATLAB) и метод Юла-Уокера (функция `ruulear` в MATLAB) [3], которые дали близкие результаты. Использованный метод нерекурсивной фильтрации – классический и описывается во временной области разностным уравнением КИХ-фильтра (функция `filter(a, 1, z)` в MATLAB [4]). Спектральное представление на входе двухмодовой дискретной помехи и полезного сигнала представлено на рисунке 1. Результаты фильтрации дискретной помехи для двух выборок с разными несущими частотами представлены для способа, взятого в качестве прототипа, на рисунке 2, а для предлагаемого способа – на рисунке 3. Как видно из этих графиков, для спосо-

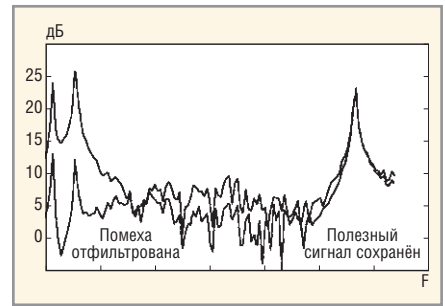


Рис. 3. Спектральное представление сигналов дискретной двухкомпонентной помехи с доплеровскими частотами компонент 10 и 20 Гц и полезного сигнала с доплеровской частотой 200 Гц после фильтрации по предложенному способу. Частота F указана с метками через 40 Гц. Пунктиром показан спектр сигнала на входе

ба, взятого в качестве прототипа, отфильтровывается и помеха, и полезный сигнал, а в предложенном способе дискретная помеха отфильтровывается, а полезный сигнал остаётся.

Чтобы проиллюстрировать работу предложенного способа, когда две выборки наблюдений имеют одну несущую частоту, внесём небольшие изменения в исходные данные. В частности, примем обе несущие равными 500 МГц, остальные параметры полезного сигнала и двухкомпонентной помехи для каждой выборки наблюдений оставим прежними, кроме периода повторения, отличающегося для второй выборки наблюдений на 5% (см. рис. 4):

$l1=300/500;$ %длина волны для первой выборки наблюдений с несущей 500МГц

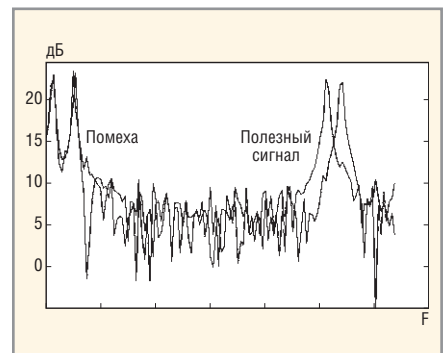


Рис. 4. Спектральное представление сигналов дискретной двухкомпонентной помехи с доплеровскими частотами компонент 10 и 20 Гц и полезного сигнала с доплеровской частотой 200 Гц на входе. Приведены две выборки с периодами повторения 1,0 и 1,05 мс

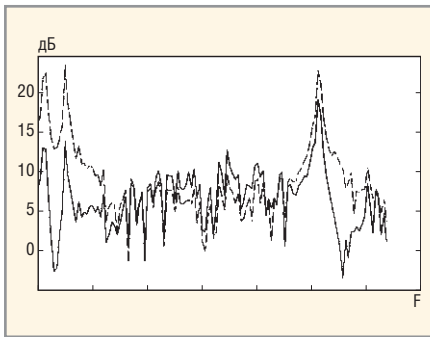


Рис. 5. Спектральное представление сигналов дискретной двухкомпонентной помехи с доплеровскими частотами компонент 10 и 20 Гц и полезного сигнала с доплеровской частотой 200 Гц после фильтрации по предложенному способу для двух выборок с разными периодами повторения. Пунктиром показан спектр сигнала на входе

```
l2=300/500;%длина волны для второй выборки наблюдений с несущей 500МГц
```

```
%ФОРМИРОВАНИЕ ВЫБОРОК НАБЛЮДЕНИЙ с разным периодом повторения
t1 = 0:0.001:0.256;%Время наблюдения 256 мс с периодом 1мс
% входной сигнал для первой выборки наблюдений
```

```
z1 = ac*exp(2*fc1*pi*t1*sqrt(-1)) + am*exp(2*fm1*pi*t1*sqrt(-1)) + as*exp(2*fs1*pi*t1*sqrt(-1)) + .1*randn(1,length(t));
```

```
% входной сигнал для второй выборки наблюдений
```

```
t2 = 0:0.00105:0.256;%Время наблюдения 268,8 мс с периодом 1,05 мс
z2 = 2*exp(2*fc2*pi*t2*sqrt(-1)) + am*exp(2*fm2*pi*t2*sqrt(-1)) + as*exp(2*fs2*pi*t2*sqrt(-1)) + .1*randn(1,length(t));
```

В соответствии с предложенным способом, расчёты коэффициентов авторегрессии и фильтрация остаются в этом случае неизменными. Результаты фильтрации дискретной помехи для двух выборок с разными частотами повторения представлены на рисунке 5. Здесь также проявляется положительный эффект от использования предложенного способа — помеха отфильтрована, а полезный сигнал остаётся без изменений.

Таким образом, проведённое моделирование в системе MATLAB подтверждает положительный эффект от при-

менения предложенного способа фильтрации дискретных помех по неклассифицированным выборкам наблюдений. Более того, данный способ был распространён на построение адаптивного решетчатого фильтра [5] и показал высокую эффективность подавления многомодовых дискретных помех.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Бартенев В.Г.* Способ адаптивной фильтрации дискретных помех Патент по заявке № 2007101649 от 17.01.07. Публикация ФМПС в Бюл. №21 от 27.07.08.
2. *Bower D.E.* Adaptive Clutter Filtering Using Autoregressive Spectral Estimation, IEEE Trans. 1979. Vol.AES-15. № 4. P. 538.
3. *Marple S.L.* Digital Spectral Analysis, Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall, 1987.
4. *Потемкин В.Г.* Справочник по MATLAB. Анализ и обработка данных.
5. <http://matlab.exponenta.ru/ml/book2/chapter8/>.
6. *Бартенев В.Г.* Адаптивный решетчатый фильтр для подавления дискретных коррелированных помех. Доклад на 10-й Международной конф. DSPA2008. Москва, 26-28 марта, 2008.