

УДК 621.391

И.А. ГЕПКО, А.А. МОСКАЛЕНКО

*Научно-исследовательский институт Радио, Украина;  
Полтавский военный институт связи, Украина*

## МЕТОД РЕЖЕКЦИИ УЗКОПОЛОСНЫХ ПОМЕХ В СИСТЕМАХ СВЯЗИ С РАСШИРЕНИЕМ СПЕКТРА СИГНАЛОВ НА ОСНОВЕ ОБЕЛЯЮЩЕЙ СОГЛАСОВАННОЙ ФИЛЬТРАЦИИ

Проанализированы существующие подходы к режекции узкополосных помех в основной полосе рабочих частот системы, выявлены их недостатки. Рассмотрены особенности воздействия узкополосной помехи, прицельной по частоте, на систему связи с прямым расширением спектра (DSSS) и петлей регулировки мощности. Предложен усовершенствованный метод режекции узкополосных помех в рабочей полосе частот системы, основанный на обеляющей согласованной фильтрации.

**узкополосная прицельная помеха, режекция помех, обеляющая фильтрация, расширяющие коды с квазиравномерным спектром, математическое моделирование**

### Введение

В условиях постоянного совершенствования средств радиоэлектронного противоборства актуальность задача разработки новых, более эффективных методов борьбы с узкополосными прицельными помехами не вызывает сомнения. На протяжении двух последних десятилетий разработан целый ряд методов режекции узкополосных помех, достаточно полно опубликованный в [1 – 4].

Адаптивный приемник, использующий предварительную обработку смеси сигнала и шума обеляющим фильтром, предложен в [1]. Такая обработка существенно улучшает характеристики приема, не обеспечивая все же максимального отношения сигнал/шум на его выходе [5]. В [3, 4] рассмотрены различные методы режекции помех, которые, однако, приводят к заметным потерям в энергетике полезного сигнала [5]. Идея квазиоптимального приема на фоне небелого шума с рассмотрением алгоритмов функционирования и количественным анализом характеристик предложена в [4]. В частности, был предложен метод двухэтапной согласованной фильтрации, реализуемый за счет дополнения согласованного фильтра, функционирующего на основе правила максимального правдоподобия, обеляющими фильтрами и петлей адаптивной постройки к параметрам шума.

Однако при разработке этого метода не учитывались взаимные спектральные свойства сигналов и помех. Так, в процессе постановки помех максимумы спектральной плотности мощности несущего сигнала могут быть определены путем спектрального анализа, после чего сформирована прицельная помеха, воздействие которой на канал связи при данной энергетике окажется намного более разрушительным. Более того, если в системе связи, являющейся объектом атаки, используется петля регулировки мощности (что характерно для всех современных сотовых систем CDMA), прицельную помеху нетрудно сформировать по реакции схемы регулировки мощности, обходясь без спектроанализатора.

**Постановка задачи исследования.** Таким образом, задачу исследования, результаты которого представляются в настоящей работе, целесообразно сформулировать как задачу повышения помехозащищенности систем связи с расширением спектра к воздействию прицельных узкополосных помех.

### Усовершенствование метода режекции узкополосных помех на основе обеляющей согласованной фильтрации

Рассмотрим принцип реализации адаптивного приема на основе обеляющей фильтрации. Струк-

турная схема адаптивного корреляционного приемника на основе обесцвечивающей фильтрации представлена на рис. 1.

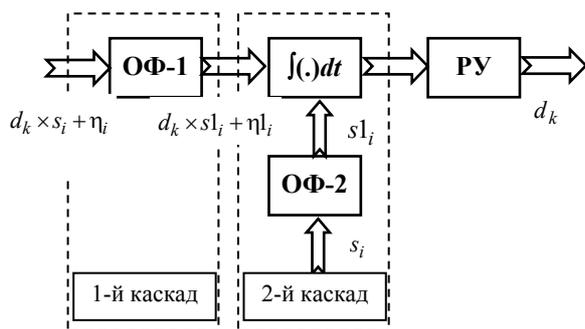


Рис. 1. Эквивалентная схема адаптивного приема на основе обесцвечивающей фильтрации

Фактором, способным оказать существенное влияние на снижение помехоустойчивости этого приемника по отношению к потенциальной, является возможность усиления шума в его первом каскаде. Оценим этот эффект, оперируя спектральными характеристиками сигнала и помехи. Для упрощения все последующие операции выполним применительно к дискретному представлению того и другого в виде  $N$  отсчетов ДПФ, т.е.  $S_k, k = 0, 1, \dots, N-1$  – спектр сигнала,  $n_k$  – спектр помехи в полосе приема. При этом АЧХ синтезируемого обесцвечивающего согласованного фильтра (ОСФ) определяется весовыми коэффициентами

$$w_k = C/n_k, \tag{1}$$

где  $C$  – некоторая константа. Нетрудно убедиться, что такой фильтр действительно является обесцвечивающим, поскольку пройдя через него, окрашенная помеха со спектром  $n_k$  приобретает равномерную спектральную плотность (с коэффициентами ДПФ  $n_k = C \forall k$ ).

Определим численное значение  $C$  (1), задаваясь условием равенства энергий опорной и преобразованной копий сигнала  $s_i$  и  $s1_i$ . При этом в частотной области имеет место равенство:

$$\sum_{k=0}^{N-1} (S_k)^2 = \sum_{k=0}^{N-1} (w_k \cdot S_k)^2,$$

откуда 
$$C^2 = \sum_{k=0}^{N-1} (S_k)^2 / \sum_{k=0}^{N-1} \left( \frac{S_k}{n_k} \right)^2.$$

Следовательно, суммарная энергия помехи в полосе приема численно равная

$$N \cdot C^2 = N \cdot \sum_{k=0}^{N-1} (S_k)^2 / \sum_{k=0}^{N-1} \left( \frac{S_k}{n_k} \right)^2,$$

по сравнению с исходным значением

$$E_n = \sum_{k=0}^{N-1} (n_k)^2$$

возрастает в

$$\begin{aligned} K_n &= N \cdot \sum_{k=0}^{N-1} (S_k)^2 / \left( \sum_{k=0}^{N-1} (n_k)^2 \cdot \sum_{k=0}^{N-1} \left( \frac{S_k}{n_k} \right)^2 \right) = \\ &= N \cdot \sum_{k=0}^{N-1} (S_k)^2 / \sum_{k=0}^{N-1} (n_k)^2 / \sum_{k=0}^{N-1} \left( \frac{S_k}{n_k} \right)^2 = \\ &= N \cdot \frac{E_S}{E_n} / \sum_{k=0}^{N-1} \left( \frac{S_k}{n_k} \right)^2 = N \cdot SNR / \sum_{k=0}^{N-1} \left( \frac{S_k}{n_k} \right)^2 \text{ раз,} \end{aligned}$$

где  $SNR$  – отношение энергий сигнала и шума на входе приемника.

Принимая во внимание условие равенства энергий полезных сигналов при применении обычной схемы оптимального приемника и обсуждаемой схемы приема с режекцией помех, запишем выражение для оценки достигаемого в последнем случае выигрыша обработки:

$$Q_n = \frac{1}{K_n} = \frac{(SNR)^{-1}}{N} \cdot \sum_{k=0}^{N-1} \left( \frac{S_k}{n_k} \right)^2. \tag{2}$$

Следующая отсюда физическая трактовка полученного результата прозрачна и интуитивно понятна даже без математических выкладок: чем более отличаются спектральные характеристики сигнала и помехи, тем легче их расфильтровать.

Также легко видеть, что при  $n_k = \text{const}$  (при белом шуме на входе приемника)  $Q_n = 1$ , и рассматриваемая схема вырождается в обычный согласованный фильтр.

Из сказанного возможно сформулировать следующий вывод: системе с расширением спектра, имеющей петлю регулировки мощности (например, любой из известных систем сотовой связи на основе технологии CDMA), может обеспечить наименьшую

уязвимость к воздействию прицельных помех при использовании сигналов с равномерным (квазиравномерным) спектром [6]. Использование кодовых последовательностей, предложенных в [6], в качестве функций расширения спектра в системе связи позволит:

- формировать ансамбль сигналов с различными спектральными характеристиками;
- уменьшить уязвимость системы связи к воздействию прицельных по частоте помех.

### Моделирование дискретного канала связи с расширением спектра и режекцией помех

С целью анализа полученных результатов проведено численное моделирование дискретного канала связи с расширением спектра и режекцией помех.

Соответствующая модель канала разработана в среде Matlab 6.1, структура которой приведена на рис. 2.

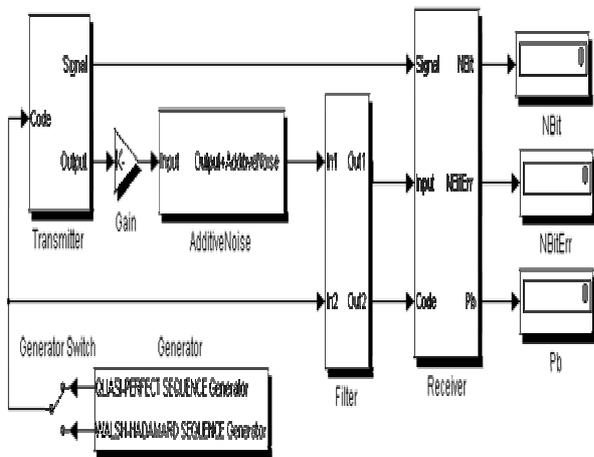


Рис. 2. Структура модели дискретного канала связи с расширением спектра и режекцией помех

В состав модели входят следующие подсистемы и элементы:

- подсистема “Transmitter” (“передатчик”), формирующая модель сигнала с расширением спектра;
- подсистема “Gain”, предназначенная для регулирования сигнала по мощности путем варьирования коэффициента его усиления;

- подсистема “Generator”, формирующая код расширения спектра;
- переключатель “Generator Switch”, служащий для выбора типа кода;
- подсистема “AdditiveNoise”, позволяющая формировать узкополосную аддитивную помеху с заданными спектральными характеристиками;
- подсистема “Filter”, в которой реализована схема режекции помехи на основе алгоритма обескураживающей фильтрации;
- подсистема “Receiver”, реализующая корреляционную обработку сигнала, подсчет переданных и ошибочно принятых информационных битов с последующим вычислением вероятности ошибки;
- табло визуализации “Nbit”, отображающее количество переданных информационных битов;
- табло “NbitErr” (отображает число битов, принятых с ошибкой);
- табло “Pb” (отображает вероятность ошибочного приема).

– Для расширения спектра сигналов в процессе моделирования использовались известные коды Уолша, а также кодовые последовательности с квазиравномерным спектром длиной  $N = 64$ .

– Узкополосная прицельная помеха формировалась на основе анализа спектральных характеристик сигналов и “помещалась” в полосу полезного сигнала в местах расположения спектральных максимумов последнего.

Моделирование было проведено для трех различных помеховых сценариев:

- при отсутствии процедуры режекции помехи (сценарий 1);
- с применением режекции помех и использованием кодов Уолша (сценарий 2);
- с применением режекции помех и использованием кодов с квазиравномерным спектром (сценарий 3).

По результатам проведенного моделирования были получены зависимости вероятности ошибоч-

ного приема информационного бита от соотношения сигнал/шум на входе приемника при воздействии на канал связи узкополосной прицельной помехи.

Полученные зависимости приведены на рис. 3, где использованы следующие обозначения:  $P_{ош}$  – вероятность ошибки в приеме одного бита информации;  $SNR$  – соотношение сигнал/шум.

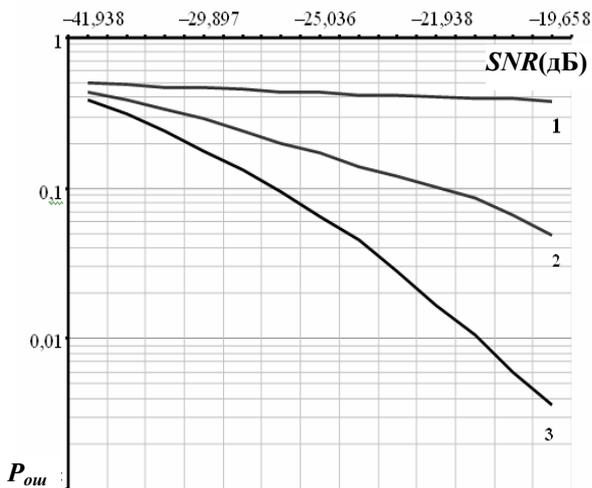


Рис. 3. Зависимость вероятности ошибки от соотношения сигнал/шум при воздействии узкополосной прицельной помехи

Из рис. 3 легко видеть, что обычная система, не использующая режекцию узкополосной помехи при столь малых отношениях сигнал/шум оказывается неработоспособной (вероятность ошибки на бит здесь близка к 0,5). В то же время, как следует из рис. 3, применение метода обесцвечивающей фильтрации позволяет существенно уменьшить уязвимость системы с расширением спектра к воздействию узкополосных помех, прицельных по частоте. Как и ожидалось, дополнительный выигрыш обработки связан с применением (в сочетании с обесцвечивающей согласованной фильтрацией) сигналов на базе кодов с квазиравномерным спектром [6]. Анализ показал, что результаты проведенного моделирования по существу подтверждают теоретический вывод (2).

## Выводы

Таким образом, в настоящей работе проанализированы существующие методы режекции узкополосных помех и выявлены их недостатки. Обоснована целесообразность совместной оптимизации характеристик обесцвечивающего согласованного фильтра и спектральных свойств сигналов, применяемых в системе. Доказано преимущество сигналов на основе кодовых последовательностей с квазиравномерным спектром, с точки зрения использования в системе связи с петлей регулировки мощности сигнала и режекцией помех. Данный метод может быть использован в системах сотовой связи технологии CDMA.

## Литература

1. Milstein L. Interference Rejection Techniques in Spread Spectrum Communications // Proc. IEEE. – June 1988. – Vol. 76, no. 6. – P. 657-670.
2. Comley V. CW Interference Excision in DSSS Communication System // IEEE MILCOM. – Oct. 1998.
3. Derryberry R. et al. An Iterative Blind Adaptive Receiver for DSSSMA Systems // IEEE MILCOM. – Oct. 1998.
4. Pawelec J. An adaptive non-AWGN SSMA receiver // IEEE Commun. Mag. – Aug. 2002. – P. 126-127.
5. Гепко И.А. Адаптивный прием сигналов в системах CDMA в условиях воздействия негауссовских помех // Зв'язок. – 2005. – № 6. – С.39-42.
6. Гепко И.А. Последовательности с максимально-равномерным спектром в дискретном базисе Фурье // Радиоелектроника (Изв. ВУЗов). – 1996. – Т. 39, № 5. – С. 33-43.

Поступила в редакцию 22.03.2007

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. С.Я. Жук, Національний технічний університет України «КПІ», Київ.