

УДК 621. 317. 089

Ю.Б. Гимпилевич, доцент, канд. техн. наук,

Ю.Я. Смаилов, С.Н. Поливкин

Севастопольский национальный технический университет

Студгородок, г. Севастополь, Украина, 99053

gimpil@mail.ru

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ РАДИОСИГНАЛОВ С БОЛЬШОЙ БАЗОЙ ПРИ СОГЛАСОВАННОЙ ФИЛЬТРАЦИИ НА ФОНЕ БЕЛОГО ШУМА

Проведена оценка эффективности применения пачки радиоимпульсов с прямоугольной огибающей и пачки кодированных в соответствии с кодом Баркера фазоманипулированных радиоимпульсов для целей согласованной фильтрации. Выведены аналитические соотношения, позволяющие приблизительно оценить эффективность. Проведены точный численный анализ эффективности и сравнение аналитических и численных результатов.

Одним из эффективных методов повышения помехозащищённости и, как следствие, увеличения дальности действия радиосистем является применение согласованной фильтрации [1]. При построении систем согласованной фильтрации немаловажным вопросом является выбор вида сигнала. Из общей теории согласованной фильтрации вытекает целесообразность использования сигналов с большой базой. К таким сигналам относятся различные варианты пачек радиоимпульсов [2].

Данные сигналы достаточно хорошо изучены, однако количественные оценки эффективности их применения в литературе отсутствуют. Задачей данной работы является получение аналитических зависимостей, позволяющих оценить выигрыш в отношении сигнал/помеха при применении сигналов в виде пачек радиоимпульсов.

Рассмотрим два случая: а) случай, когда пачка сформирована из когерентных радиоимпульсов, следующих с некоторой скважностью N ; б) случай, когда пачка представляет собой последовательность фазоманипулированных по коду Баркера радиоимпульсов, следующих со скважностью, равной единице.

Как известно, выигрыш в отношении сигнал/помеха, который можно получить в случае применения согласованного фильтра, определяется как [1]:

$$q = \sqrt{Q}, \quad (1)$$

где $Q = 2\Delta f T_c$ — база сигнала; Δf — ширина спектра сигнала; T_c — длительность сигнала.

Длительность пачки определяется выражением

$$T_c = T(n-1) + t_n, \quad (2)$$

где T — интервал следования импульсов в пределах пачки; n — количество импульсов в пачке; t_n — длительность одного импульса.

Проведем приближенную теоретическую оценку выигрыша, определяемого формулой (1), для двух оговоренных выше случаев. С учетом (2) выражение для выигрыша (1) принимает вид

$$q = \sqrt{2\Delta f T_c} = \sqrt{2\Delta f (T(n-1) + t_n)}. \quad (3)$$

Известно, что ширина спектра сложного сигнала, состоящего из набора элементов, в основном определяется элементом с наименьшей длительностью. Следовательно, для случая пачки импульсов ширина спектра будет определяться длительностью одной посылки из этой пачки. Эффективная ширина спектра посылки длительностью t_n , в соответствии с энергетическим критерием (полоса частот, в которой содержится 90% энергии сигнала) определяется соотношением [1]

$$\Delta f = 2/t_n. \quad (4)$$

Подставляя (4) в (3) и учитывая, что отношение T/t_n есть скважность N , получаем:

$$q \approx 2\sqrt{\frac{T}{t_n}(n-1) + 1} = 2\sqrt{N(n-1) + 1}. \quad (5)$$

Для пачки, содержащей достаточно большое число импульсов ($n > 1$, $Nn \gg 1$), можно представить выражение (5) в следующем виде:

$$q \approx 2\sqrt{N(n-1)}. \quad (6)$$

Таким образом, согласно (5) и (6) для оценки выигрыша, получаемого от применения пачки радиоимпульсов с прямоугольной огибающей, достаточно знать число импульсов в пачке и скважность последовательности. Причем, чем больше произведение Nn , тем больше величина выигрыша. В частности, в случае $n = 10$ и $N = 100$ выигрыш составит $q \approx 60$.

Для фазоманипулированной по коду Баркера последовательности выражение (6) ещё более упрощается, поскольку в этом случае $N = 1$, что дает

$$q \approx 2\sqrt{n}. \quad (7)$$

Таким образом, в соответствии с (7) для данного случая выигрыш определяется только количеством импульсов в посылке. Поскольку максимальное количество позиций в коде Баркера $n = 13$, то максимально достижимый выигрыш в соответствии с формулой (7) составляет величину $q \approx 2\sqrt{13} \approx 7,2$. Таким образом, применение кодированных по Баркеру фа-

зоманипулированных пачек позволяет получить гораздо меньший выигрыш в отношении сигнал/помеха. Однако значительно лучшие корреляционные свойства таких сигналов (по сравнению с обычной пачкой) определили их достаточно широкое применение в системах обнаружения сигналов.

Полученные соотношения позволяют аналитически оценить выигрыш в отношении сигнал/помеха для рассмотренных видов радиосигналов. Однако эти соотношения являются приближенными, поскольку эффективная ширина спектра этих сигналов, вообще говоря, отличается от принятой нами при проведении выкладок.

Точный расчет эффективности проведем численным методом. Эффективная ширина спектра сигнала, как известно, определяется характером зависимости модуля спектральной плотности $S(f)$ этого сигнала от частоты. Расчет этих зависимостей для рассматриваемых сигналов проведем с использованием преобразования Фурье. Результаты расчета иллюстрируются спектрограммами, изображенными на рисунке 1. При расчетах приняты следующие исходные данные: количество импульсов в когерентной пачке $n = 7$, скважность $N = 7$ при длительности $t_n = 1$ мс. Для фазоманипулированной пачки количество позиций составило $N = 7$ при той же длительности радиоимпульса, как в предыдущем сигнале. Частота несущего колебания $f_0 = 1$ МГц.

Из рисунка 1 следует, что графики в обоих случаях симметричны относительно несущей частоты f_0 . Основная часть энергии этих сигналов сосредоточена в небольшой полосе частот, сосредоточенной в окрестности несущей частоты, поскольку спектры этих сигналов обладают свойством узкополосности. Ввиду симметрии спектрограмм можно считать, что энергия по спектру распределена также симметрично относительно несущей частоты. Это позволяет точно рассчитать эффективную ширину спектра указанных сигналов с использованием равенства Парсеваля. Для узкополосных радиосигналов с симметричными спектрами энергия, сосредоточенная в полосе частот $\Delta \omega$, может быть записана в виде

$$\mathcal{E}(\Delta f) = 2 \int_{f_0 - \Delta f/2}^{f_0 + \Delta f/2} S^2(f) df. \quad (8)$$

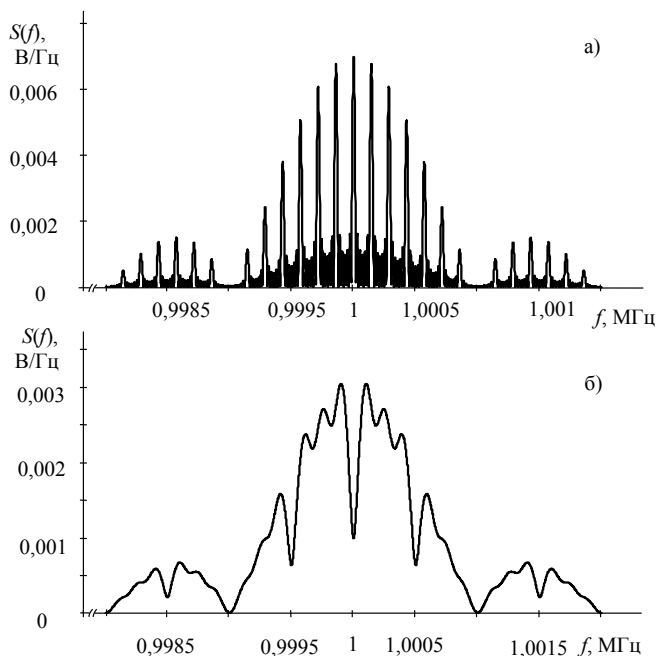


Рисунок 1 — Зависимости модуля спектральной плотности от частоты:
 а) для когерентной пачки радиоимпульсов;
 б) для фазоманипулированной по коду Баркера последовательности радиоимпульсов

Запишем выражение для долевого коэффициента $\gamma(\Delta f)$, который определим как отношение энергии, сосредоточенной в полосе частот Δf , к полной энергии сигнала $\mathcal{E}$. С учетом (8) можно записать

$$\gamma(\Delta f) = \frac{\mathcal{E}(\Delta f)}{\mathcal{E}} = \frac{2 \int_{f_0 - \Delta f/2}^{f_0 + \Delta f/2} S^2(f) df}{\int_0^{T_c} s^2(t) dt}. \quad (9)$$

Графики зависимости долевого коэффициентов $\gamma(\Delta f)$ (9), рассчитанные для рассматриваемых сигналов, представлены на рисунке 2.

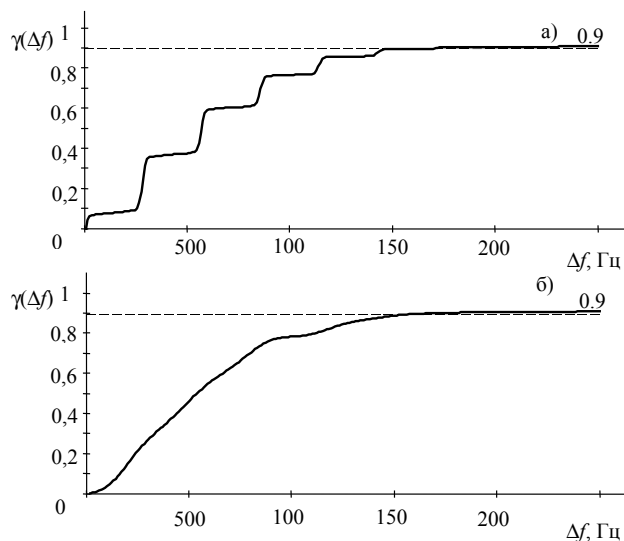


Рисунок 2 — Графики зависимости долевого коэффициента от полосы Δf :

а) для когерентной пачки радиоимпульсов;

б) для фазоманипулированной по коду Баркера последовательности радиоимпульсов

Из рисунка 2 следует, что с увеличением Δf долевые коэффициенты немонотонно стремятся к единице. Используя полученные результаты, определим эффективную ширину спектра для каждого из рассматриваемых сигналов, полагая, что это такая полоса частот, в пределах которой сосредоточено 90% полной энергии сигнала, что соответствует условию

$$\gamma(\Delta f_{\text{эф}}) = 0,9. \quad (10)$$

Алгоритм решения задачи заключается в следующем. Решив уравнение (10) относительно $\Delta f_{\text{эф}}$, определяем базу сигнала Q , затем, подставив полученный результат в (1), рассчитываем точное значение эффективности q . Результаты расчета эффективности для когерентной пачки радиоимпульсов представлены в таблице 1. Расчеты проведены при различных значениях количества радиоимпульсов n и скважности N .

Таблица 1 — Результаты расчетов для когерентной пачки радиоимпульсов

Кол-во пульсов в пачке n	Скважность N	Выигрыш q		Погреш- ность, %
		Расчет по формуле (6)	Численный расчет	
4	4	6,9	6,1	13,2

5	5	8,9	8,2	9,4
7	7	12,9	11,6	11,7
11	11	20,9	19	10,4
13	13	24,9	23,1	8,1
11	100	63,2	58,4	8,2
25	100	97,9	90,8	8,7
13	600	169,7	156	7,9

Анализ данных, приведенных в таблице 1, показывает, что расчеты по приближенной формуле (6) достаточно хорошо совпадают с численными точными данными. С увеличением скважности отличие результатов уменьшается. При этом погрешность составляет в среднем десять процентов.

В таблице 2 представлены результаты расчетов для последовательности радиоимпульсов, кодированных по Баркеру. Расчеты проведены для всех возможных значений количества позиций в коде Баркера: $n = 3, 4, 5, 7, 11, 13$. Анализ данных, приведенных в таблице 2, показывает, что расчеты по приближенной формуле (7), также достаточно хорошо совпадают с численными точными расчетами. С увеличением количества позиций отличие результатов уменьшается. При этом погрешность составляет в среднем девять процентов.

Таблица 2 — Результаты расчетов для последовательности радиоимпульсов по Баркеру

Кол-во позиций n	Выигрыш q		Погрешность, %
	Расчет по формуле (7)	Численный расчет	
4	4	3,4	17,6
5	4,5	4,0	11,8
7	5,2	4,9	7,5
11	6,6	6,2	7,5
13	7,2	7,15	0,8

Таким образом, формулы (6) и (7) позволяют с достаточной для практики точностью оценить эффективность применения сигналов с большой базой для согласованной фильтрации.

Область применения полученных результатов: радиолокация, системы передачи данных, сложные измерительные системы и др.

В результате проделанной работы была проведена оценка эффективности применения некоторых типов радиосигналов для цепей согласованной фильтрации, выведены аналитические соотношения, а также проведено сравнение результатов, получаемых с использованием полученных соотношений и в результате точного численного анализа.

Задачами дальнейших исследований является анализ возможностей применения радиосигналов с большой базой и принципов согласованной фильтрации в сложных измерительных системах с целью повышения помехоустойчивости измерительных каналов.

Библиографический список

1. Гоноровский И.С. Радиотехнические системы и сигналы / И. С. Гоноровский. — М.: Радио и связь, 1986. — 512 с.
2. Баклицкий В.К. Методы фильтрации сигналов в корреляционно-экстремальных системах навигации / В.К. Баклицкий, А.М. Бочкарев, М.П. Мусьяков. — М.: Радио и связь, 1986. — 216 с.

Поступила в редакцию 09.06.2003 г.