



УДК 621.391.26

Г. З. Аксельрод
АО "НИИ измерительных приборов – Новосибирский завод
им. Коминтерна"
К. А. Елагина
Новосибирский государственный технический университет

Применение сигнала с нелинейной частотной модуляцией для уменьшения потерь обнаружения

Рассмотрены возможности применения сигнала с нелинейной частотной модуляцией для уменьшения потерь обнаружения. Оценена эффективность обнаружителя такого сигнала многоканальным согласованным фильтром в диапазоне доплеровских частот.

Весовая обработка, ЛЧМ-сигнал, НЧМ-сигнал, потери обнаружения, ложное обнаружение, боковые лепестки

Задача обнаружения сигналов с низким уровнем боковых лепестков (УБЛ) без потерь отношения "сигнал/шум" (ОСШ) рассматривалась ранее [1]. При согласованной фильтрации для снижения уровня боковых лепестков применяется весовая обработка (ВО). При этом главный лепесток (ГЛ) сжатого сигнала расширяется, а его пиковое значение уменьшается. В настоящей статье продолжено решение задачи уменьшения потерь на ВО во временной области.

Алгоритм обнаружения, обрабатывающий сигналы с нелинейной частотной модуляцией (НЧМ), не требует применения ВО для подавления боковых лепестков, что позволяет избежать потерь ОСШ [1]. Однако при наличии сдвига по доплеровской частоте отклик согласованного фильтра (СФ) НЧМ-сигнала сильно искажается [1]. Представляет интерес анализ диапазона частот Доплера, в которых приемлемо использование сигналов с НЧМ, а также определение числа каналов многоканального по частоте Доплера СФ, при котором практически отсутствуют потери обнаружения. Таким образом, цели настоящей статьи заключаются в изучении возможности синтеза НЧМ-сигналов с низким УБЛ без потерь ОСШ, а также в оценке числа каналов многоканального СФ НЧМ-сигнала.

В [2] рассмотрено формирование НЧМ за счет изменения фазы сигнала от времени по закону, задаваемому полиномом K -го порядка:

$$\varphi(t) = \sum_{k=0}^K a_k t^k, \quad (1)$$

где a_k – коэффициенты полинома.

НЧМ предложено¹ формировать по закону

$$\varphi(t) = \frac{\pi W}{T} t^2 - \frac{W/2}{2\pi/T} \cos[(2\pi/T)t], \quad (2)$$

где W , T – полоса и длительность НЧМ-сигнала соответственно.

Авторами настоящей статьи для уменьшения УБЛ без ВО предложен сигнал с формированием мгновенной частоты по закону

$$\Delta f(t) = \frac{W \{t/T - 0.5 + k_1 \operatorname{tg} [k_2 \pi (t/T - 0.5)]\}}{1 + 2k_1 \operatorname{tg} (0.5k_2 \pi)}, \quad (3)$$

где $k_1 = 0.105$; $k_2 = 0.91$ – коэффициенты нелинейности частотной модуляции, подобранные эмпирически.

Коэффициенты нелинейности подбирались по критерию минимума УБЛ при равенстве ширины ГЛ сжатых НЧМ-сигнала и ЛЧМ-сигнала с ВО. Формирование НЧМ согласно (3) выполняется

¹ Ананьев А. В., Безуглов Д. А., Юхнов В. И. Повышение помехоустойчивости узкополосных каналов радиосвязи на основе применения сигналов с внутримпульсной частотной модуляцией // Современные проблемы науки и образования. 2013. № 1. С. 1–9. URL: <http://www.science-education.ru/107-8209>

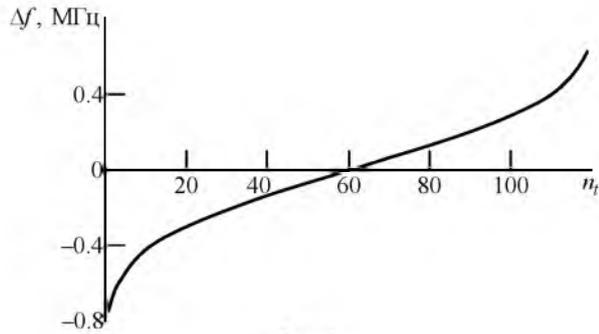


Рис. 1

добавлением к линейному закону изменения частоты от времени нелинейной аддитивной составляющей².

На рис. 1 показан график изменения мгновенной частоты Δf в зависимости от номера временного отсчета n_t для НЧМ-сигнала с параметрами $T = 40$ мс, $W = 1.5$ МГц при частоте дискретизации $f_d = 3$ МГц.

Моделирование сигналов (1)–(3) показало, что УБЛ у сигнала (1) больше, чем у сигнала, сформированного в соответствии с (3). Для сигнала (2) низкий УБЛ можно получить только при малой базе, например для сигнала длительностью $T = 7.22$ мкс с девиацией $W = 1.5$ МГц.

По результатам сравнительного моделирования решено провести сравнительный анализ свойств НЧМ- (3) и ЛЧМ-сигнала с ВО по УБЛ. Сравнимые сигналы имели равную ширину ГЛ сжатого сигнала (количество отсчетов на уровне – 3 дБ). В качестве ВО ЛЧМ-сигнала принята обработка по Хэммингу с относительным пьедесталом 0.08. Параметры анализируемых сигналов представлены в табл. 1.

При обработке ЛЧМ- и НЧМ-сигналов СФ оптимален только для тех из них, которые являются точной копией переданного сигнала. При сдвиге входных сигналов по частоте пиковое значение отклика СФ уменьшается, а временное положение пика изменяется. Зависимость параметров сжатого ЛЧМ-сигнала от доплеровской частоты представлена в [1]. Для НЧМ-сигналов аналогичных работ найти не удалось.

Средняя величина потерь пика огибающей сжатого в СФ сигнала в полосе частот без учета потерь дискретизации [%] рассчитывалась как

Таблица 1

Тип сигнала	Тип сигнала			
	ЛЧМ без ВО	ЛЧМ с ВО	НЧМ	
$T, \text{ мкс}$	$W, \text{ МГц}$	УБЛ, дБ		
20	2.50	-23.98	-36.13	-30.99
40	2.50	-25.28	-42.29	-35.89
80	0.75	-13.51	-39.23	-30.48

$$\Delta \bar{L}_a = \left[\frac{1}{M} \sum_{k=1}^M \left(1 - \frac{U}{U_0} \right) \right] 100, \quad (4)$$

где M – количество точек на оси частот Доплера, в которых оценивались потери пикового значения; U, U_0 – значения пика огибающей отклика СФ, настроенного на нулевую частоту Доплера, на эхосигнал движущейся и неподвижной целей соответственно.

Рассмотрены цели, характеризующиеся следующими параметрами динамики:

- имеют доплеровские частоты до 12 кГц, что при работе РЛС на частоте 3 ГГц соответствует скорости движения цели до 600 м/с (для этих целей принято $M = 13$);

- имеют доплеровские частоты до 140 кГц, что при работе РЛС на частоте 3 ГГц соответствует скорости движения цели до 7 км/с (для этих целей принято $M = 141$).

Зависимости нормированного пика огибающей сжатых в СФ сигналов $U_H = U/U_{0_{\text{ЛЧМ}}}$ представлены на рис. 2: *a* – цели первой группы; *b* – цели второй группы ($U_{0_{\text{ЛЧМ}}}$ – значение пика огибающей отклика СФ, настроенного на нулевую частоту Доплера, на эхосигнал неподвижной цели для ЛЧМ-сигнала). Зависимости построены для сигналов, указанных в нижней строке табл. 1. Для целей первой группы получены следующие оценки (4): НЧМ-сигнал $\Delta \bar{L}_a = 2.55\%$; ЛЧМ-сигнал без ВО $\Delta \bar{L}_a = 1.63\%$; ЛЧМ-сигнал с ВО по Хэммингу $\Delta \bar{L}_a = 14.91\%$. Для целей второй группы имеем: НЧМ-сигнал $\Delta \bar{L}_a = 28.60\%$; ЛЧМ-сигнал без ВО $\Delta \bar{L}_a = 10\%$; ЛЧМ-сигнал с ВО по Хэммингу $\Delta \bar{L}_a = 16.71\%$.

Таким образом, средние потери пика огибающей НЧМ-сигнала по сравнению ЛЧМ-сигналом в диапазоне доплеровских частот 0...12 кГц незначительны. В диапазоне доплеровских частот 12...140 кГц исходя из уровней УБЛ и пикового значения ЛЧМ-сигнал с ВО более эффективен. Проведенные расчеты показывают, что выигрыш

² Тельминов О. А. Перспективные методы частотной модуляции зондирующих сигналов для задач синтеза радиолокационных изображений // Материалы 5-й Междунар. конф. "Цифровая обработка сигналов и ее применение" (DSPA-2003): в 2 т. Т. 1. М., 12–14 марта 2003 г. / М.: Российское НТО РЭС им. А. С. Попова, 2003. 4 с. URL: http://www.autex.spb.su/download/dsp/dspa/dspa2003/tom1_69.pdf

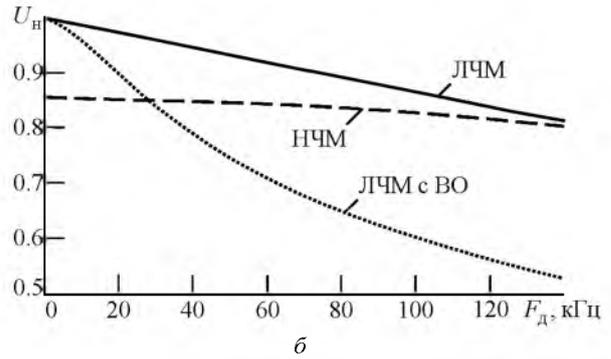
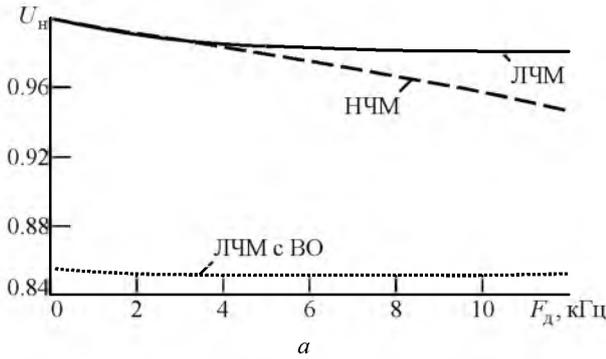


Рис. 2

по значению средних потерь пика огибающей при использовании НЧМ-сигнала во всем диапазоне доплеровских частот 0...140 кГц можно получить лишь для сигналов с малой базой (например, с длительностью 20 мкс и с девиацией 2.5 МГц).

Из рис. 2, б видно, что в диапазоне доплеровских частот 0...140 кГц имеются большие потери пика огибающей выходного сигнала СФ. Для уменьшения указанных потерь при согласованной фильтрации сигнала с неизвестной доплеровской частотой следует применить многоканальный СФ (рис. 3). В качестве выходного сигнала такого фильтра блоком МАХ отбирается максимальный сигнал с одного из каналов согласованной фильтрации, который нормируется на мощность шума. Алгоритм обнаружения НЧМ-сигнала многоканальным по доплеровской частоте СФ имеет вид

$$U_{out\text{НЧМ}} = \begin{cases} 1, & U_{\text{НЧМ}_{max}}^2 / \hat{P}_{ш} \geq C_{\text{НЧМ}}; \\ 0, & U_{\text{НЧМ}_{max}}^2 / \hat{P}_{ш} < C_{\text{НЧМ}}, \end{cases}$$

где

$$U_{\text{НЧМ}_{max}} = \max_n U_{\text{НЧМ}_n}, \quad n = \overline{1, M};$$

$\hat{P}_{ш}$ – оценка мощности шума (выполняется при отсутствии принимаемого сигнала); $C_{\text{НЧМ}}$ – порог обнаружения, зависящий от количества каналов СФ, причем $U_{\text{НЧМ}_n}$ – отклик n -го канала СФ на НЧМ-сигнал; M – количество каналов многоканального СФ.

Для реализации многоканального СФ требуется оценить количество его каналов с учетом среднего значения потерь пика огибающей в анализи-

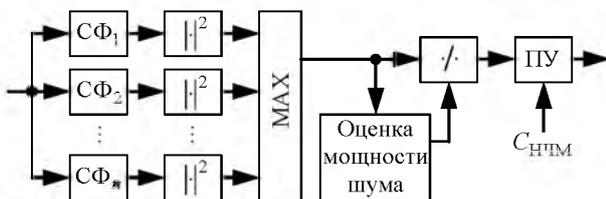


Рис. 3

руемой полосе доплеровских частот при различных значениях девиации и длительности сигналов.

В табл. 2 приведены потери пика огибающей $\Delta \bar{L}_a$ (4), усредненные в полосе доплеровских частот 0...140 кГц, без учета потерь дискретизации для НЧМ-сигналов, сформированных в соответствии с (3) с параметрами, указанными в табл. 1, при их обработке многоканальными СФ с различным количеством каналов. Указанное в табл. 2 количество каналов соответствует обработке доплеровского сдвига одного знака, для учета знака доплеровского сдвига количество каналов необходимо удвоить. В этой же таблице для сравнения приведены результаты обработки ЛЧМ-сигналов с теми же параметрами одноканальным СФ без ВО и с ВО.

Из данных табл. 2 следует, что при использовании 8–32 каналов многоканального СФ НЧМ-сигнала достигаются потери пика огибающей сжатого сигнала на уровне 0.6–1.6 % по сравнению потерями 10–11 % в зависимости от параметров сигнала при обработке ЛЧМ-сигнала одноканальным СФ. В последнем случае значения потерь объясняются существенной шириной рассматриваемого частотного диапазона.

Наряду с доплеровским сдвигом частоты на результаты согласованной обработки оказывает влияние временное рассогласование сигнала внутри интервала дискретизации и объединение результатов канальной обработки на выходе многоканального СФ. С учетом этого фактора определены полные потери в системе обнаружения с многоканальным СФ НЧМ-сигналов с параметрами из табл. 1 по сравнению с ЛЧМ-сигналом без ВО при отсутствии

Таблица 2

Параметр сигнала	Тип сигнала					
	ЛЧМ без ВО	ЛЧМ с ВО	НЧМ			
	Количество каналов многоканального СФ					
	–	–	8	16	32	
	$\Delta \bar{L}_a, \%$					
$T, \text{ мкс}$	$W, \text{ МГц}$					
20	2.50	10.49	18.55	1.62	0.45	–
40	2.50	11.19	18.66	–	1.25	0.44
80	0.75	10.00	16.71	–	0.97	0.61

Таблица 3

Параметр сигнала	Тип сигнала					
	ЛЧМ без ВО	ЛЧМ с ВО	НЧМ			
	Количество каналов многоканального СФ					
	–	–	8	16	32	
T , мкс	W , МГц	$\Delta\bar{L}$, %				
20	2.50	0.89	1.70	0.62	0.74	0.91
40	2.50	0.95	1.71	0.64	0.76	0.93
80	0.75	0.89	1.58	0.72	0.80	0.94

временного сдвига и сдвига по частоте Доплера. Анализ проведен по значениям отношения "сигнал/шум" ψ , соответствующим вероятности обнаружения 0.5, для порога обнаружения, обеспечивающего вероятность ложной тревоги 10^{-6} . Полные потери определены следующим образом:

$$\Delta\bar{L} = \frac{1}{m} \sum_{t=1}^m \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta L_{ti} \right), \quad (7)$$

где $m = 141$ – количество отсчетов частоты доплеровского сдвига; $n = 6$ – количество дискретных временных смещений сигнала относительно половины интервала дискретизации; $\Delta L_{ti} = \psi_{\text{ЧМ}_{ti}} - \psi_{\text{ЛЧМ}_{00}}$ – потери при обработке НЧМ- или ЛЧМ-сигналов с t -м доплеровским сдвигом и i -м временным смещением, причем $\psi_{\text{ЧМ}_{ti}}$ – пороговое отношение "сигнал/шум" при обработке НЧМ- или ЛЧМ-сигнала с t -м доплеровским сдвигом и i -м временным смещением; $\psi_{\text{ЛЧМ}_{00}}$ – то же для ЛЧМ-сигнала без доплеровского сдвига и временного смещения. Результаты расчетов сведены в табл. 3.

Для обнаружителя НЧМ-сигнала данные потери складываются из потерь на рассогласование СФ по частоте Доплера, рассогласование СФ во времени и потерь из-за объединения каналов в многоканальном СФ. Для обнаружителя ЛЧМ-сигнала без ВО потери складываются из потерь на рассогласование СФ по частоте Доплера и по времени. Для обнаружителя ЛЧМ-сигнала с ВО полные потери дополняются потерями на ВО.

Приведенные в табл. 3 результаты свидетельствуют, что с ростом числа доплеровских каналов полные потери (7) увеличиваются, однако средняя величина потерь пика огибающей сжатого сигнала (4) уменьшается (табл. 2). По результатам расчетов установлено, что для низкого УБЛ в

диапазоне 0...140 кГц необходимо использовать 16–32 канала СФ в зависимости от параметров сигналов. При единственном сигнале на входе СФ средние по частоте Доплера и по сдвигам внутри интервала дискретизации потери при использовании обнаружителя ЛЧМ-сигналов без ВО и с ВО не меньше потерь при использовании обнаружителя НЧМ-сигнала с многоканальным СФ, однако реализация последнего решения сложнее.

Оценка эффективности многоканального обнаружителя при наличии произвольного числа сигналов на входе СФ и при нормировке сигнала к мощности шума и к УБЛ с целью стабилизации ложных обнаружений выходит за рамки данной статьи и будет исследоваться далее.

В настоящей статье показано, что при использовании многоканального СФ НЧМ-сигнала с предложенным законом изменения мгновенной частоты (3) можно получить низкий УБЛ. При этом отсутствуют потери на ВО во временной области.

Показана эффективность применения обнаружителя НЧМ-сигнала с многоканальным СФ для уменьшения потерь обнаружения при наличии на входе СФ одного сигнала. Кроме малых потерь пика огибающей сжатого сигнала (менее 1 % по величине средних потерь в диапазоне частот Доплера 0...140 кГц) обнаружители НЧМ-сигнала с 16- и 32-канальным СФ показывают результаты не хуже обнаружителя ЛЧМ-сигнала без ВО и превосходят обнаружитель ЛЧМ-сигнала с ВО на 0.6...1 дБ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кук Ч, Бернфельд М. Радиолокационные сигналы. М.: Сов. радио, 1971. 568 с.
2. Бессонова Е. В., Ирхин В. И. Уменьшение уровня боковых лепестков автокорреляционной функции

сложных сигналов // Тр. XV науч. конф. по радиофизике / ННГУ. Нижний Новгород, 2011. С.131–133.

G. Z. Akselrod

SC "Research institute of the measuring instrument – Comintern Novosibirsk plant"

K. A. Elagina

Novosibirsk state technical university

The using nonlinear frequency signal for reduction the losses of the detection

There is usage of the processing of nonlinear frequency signals considered to reduce the losses of the detection. The efficiency of a nonlinear frequency signal detector width multichannel filter it is valued in range of the Doppler frequencies.

Weighting, linear frequency signal, nonlinear frequency signal, losses of the detection, false detection, side lobes

Статья поступила в редакцию 2 апреля 2014 г.