

УДК 621.396.983

ОБЗОР ПО РАДИАЛЬНОМУ УСКОРЕНИЮ В ЗАДАЧАХ РАДИОЛОКАЦИОННОГО НАБЛЮДЕНИЯ ОТДЕЛЯЮЩИХСЯ ОБЪЕКТОВ

Б. АЛЬ-ЖЕЛИЛИ, С.А. ГОРШКОВ

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
П. Бровка, 6, Минск, 220013, Беларусь*

*Военная академия Республики Беларусь
Минск 220057, Беларусь*

Поступила в редакцию 28 июня 2006

Рассмотрена форма четырехпараметрической функции неопределенности ЛЧМ сигнала и ее влияние на число каналов обработки при обзоре по радиальному ускорению. Показано, что число каналов обработки может быть уменьшено при смещении момента обнаружения по времени запаздывания или при уменьшении времени когерентного накопления.

Ключевые слова: функция неопределенности, ЛЧМ сигнал, рассогласование, обзор по радиальному ускорению, число каналов обработки.

Введение

Особенности радиолокационного наблюдения движущихся с радиальным ускорением объектов на фоне мешающих сигналов сводятся к когерентной компенсации мешающих сигналов и когерентному накоплению искаженного предыдущим этапом обработки полезного сигнала с изменяющейся доплеровской частотой. На ограниченных временных интервалах закон изменения частоты можно считать линейным. Для расширения возможностей обработки когерентное накопление дополняют некогерентным.

Ускорение объекта заранее неизвестно, что приводит к необходимости ведения обзора по радиальному ускорению (скорости изменения частоты Доплера). Одновременный обзор обеспечивает минимальные временные затраты на решение задачи обнаружения, но приводит к многоканальности обнаружителя. Для минимизации числа каналов обработки необходимо оптимизировать максимально допустимые расстройки по ускорению между двумя соседними фильтрами, что и является целью данной статьи.

Тело неопределенности ЛЧМ сигнала, учитывающее расстройки по времени, частоте и девиации частоты

Наиболее полную информацию о допустимых времячастотных рассогласованиях параметров ожидаемого сигнала несет его функция неопределенности (ФН) $\rho(\tau, F)$ [1, 2]. Здесь τ — рассогласование по времени запаздывания, а F — по частоте. Для фиксированного времени когерентного накопления $T_{\text{кн}}$, определяющего длительность сигнала T_0 , введем дополнительные параметры ФН: частотные девиации ожидаемого Δf_m и опорного $\Delta f_m - dF$ сигналов, где dF — расстройка девиации частоты. Тогда ФН прямоугольного импульса с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ), зависящую от четырех параметров, можно записать в следующем виде:

$$\rho(\tau, F, \Delta f_m, dF) = \frac{1}{T_0} \left| \int_{-\infty}^{\infty} U_0(t, \Delta f_m) U_0^*(t - \tau, \Delta f_m - dF) e^{-i2\pi Ft} dt \right|^2, \quad (1)$$

$$\text{где } U_0(t, \Delta f_m) = \begin{cases} \exp\left\{i\pi \frac{\Delta f_m}{T_0} t^2\right\}, & 0 \leq t \leq T_0, \\ 0, & t < 0, t > T_0 \end{cases}$$

— закон модуляции ЛЧМ сигнала.

Подставляя выражение для закона модуляции в (1) и ограничивая пределы интегрирования интервалом от 0 до $T_0 - |\tau|$, получим:

$$\begin{aligned} \rho(\tau, F, \Delta f_m, dF) &= \frac{1}{T_0^2} \left| \int_0^{T_0 - |\tau|} \exp\left\{i\pi \frac{\Delta f_m}{T_0} t^2\right\} \exp\left\{-i\pi \frac{\Delta f_m - dF}{T_0} (t - \tau)^2\right\} \exp\{-i2\pi Ft\} dt \right|^2 = \\ &= \frac{1}{T_0^2} \left| \int_0^{T_0 - |\tau|} \exp\left\{i\pi \left[\frac{dF}{T_0} t^2 + 2\left(\frac{\Delta f_m - dF}{T_0} \tau - F\right)t - \frac{\Delta f_m - dF}{T_0} \tau^2 \right] \right\} dt \right|^2. \end{aligned} \quad (2)$$

Преобразуя показатель экспоненты в (2) в соответствии с выражением

$$\begin{aligned} \frac{dF}{T_0} t^2 + 2\left(\frac{\Delta f_m - dF}{T_0} \tau - F\right)t - \frac{\Delta f_m - dF}{T_0} \tau^2 &= \\ = \frac{dF}{T_0} \left(t + \frac{T_0}{dF} \left(\frac{\Delta f_m - dF}{T_0} \tau - F \right) \right)^2 - \frac{T_0}{dF} \left(\frac{\Delta f_m - dF}{T_0} \tau - F \right)^2 - \frac{\Delta f_m - dF}{T_0} \tau^2 \end{aligned}$$

и вынося затем в (2) не зависящие от t члены за знак интегрирования, получим:

$$\begin{aligned} \rho(\tau, F, \Delta f_m, dF) &= \frac{1}{T_0^2} \left| \int_0^{T_0 - |\tau|} \exp\left\{i\pi \left[\frac{dF}{T_0} \left(t + \frac{T_0}{dF} \left(\frac{\Delta f_m - dF}{T_0} \tau - F \right) \right)^2 \right] \right\} dt \right|^2 \times \\ &\times \exp\left\{-i\pi \left[\frac{T_0}{dF} \left(\frac{\Delta f_m - dF}{T_0} \tau - F \right)^2 + \frac{\Delta f_m - dF}{T_0} \tau^2 \right] \right\} \Big|^2. \end{aligned} \quad (3)$$

Перейдем к новой переменной интегрирования:

$$x = \sqrt{\frac{2dF}{T_0}} \left(t + \frac{T_0}{dF} \left(\frac{\Delta f_m - dF}{T_0} \tau - F \right) \right).$$

Выполнив необходимые преобразования и учитывая, что комплексная экспонента за знаком интеграла не влияет на результат, получим:

$$\rho(\tau, F, \Delta f_m, dF) = \frac{1}{2T_0 dF} \left| \int_{x_1}^{x_2} \exp\left\{i \frac{\pi}{2} x^2\right\} dt \right|^2. \quad (4)$$

Пределы интегрирования x_1 и x_2 определяются следующим образом:

$$x_1 = \sqrt{\frac{2dF}{T_0}} \left(\frac{\Delta f_m - dF}{T_0} \tau - F \right); \quad x_2 = \sqrt{2dFT_0} \left(1 - \frac{|\tau|}{T_0} + \frac{1}{dF} \left(\frac{\Delta f_m - dF}{T_0} \tau - F \right) \right). \quad (5)$$

Интеграл в (4) может быть представлен в следующей форме:

$$\int_{x_1}^{x_2} \exp\left\{i \frac{\pi}{2} x^2\right\} dt = \left(\int_0^{x_2} \cos \frac{\pi}{2} x^2 dt - \int_0^{x_1} \cos \frac{\pi}{2} x^2 dt \right) + i \left(\int_0^{x_2} \sin \frac{\pi}{2} x^2 dt - \int_0^{x_1} \sin \frac{\pi}{2} x^2 dt \right). \quad (6)$$

Учитывая, что входящие в (6) интегралы вида

$$c(a) = \int_0^a \cos\left\{\frac{\pi}{2} x^2\right\} dt \quad \text{и} \quad s(a) = \int_0^a \sin\left\{\frac{\pi}{2} x^2\right\} dt$$

представляют собой табулированные функции косинус- и синус-интегралы Френеля, получим конечное выражение для ФН:

$$\rho(\tau, F, \Delta f_m, dF) = \frac{[c(x_2) - c(x_1)]^2 + [s(x_2) - s(x_1)]^2}{2T_0 dF}. \quad (7)$$

Выражение (7) имеет неопределенность при $dF = 0$ и принимает после раскрытия в данной точке значение, равное 1.

Анализ четырехпараметрической ФН ЛЧМ сигнала

Анализа свойств четырехпараметрической ФН ЛЧМ сигнала $\rho(\tau, F, \Delta f_m, dF)$ будем проводить на основании вида ФН $\rho(\tau, dF)$ при $F = \text{const}$ и $\Delta f_m = \text{const}$, а также их двумерных сечений плоскостями $\rho(\tau, dF) = \text{const}$, $\tau = \text{const}$ и $dF = \text{const}$. Для правильной интерпретации результатов такого анализа конкретизируем условия наблюдения и параметры сигналов. Пусть время когерентной обработки сигнала $T_{\text{кн}} = T_0$ ограничено и равно 0,256 мс, период повторения импульсов $T_{\text{п}}$ составляет 0,25 мс, а длина волны λ равна 3 см.

Расчет ФН проводился двумя способами: путем моделирования коррелятора с требуемыми расстройками параметров и расчетным путем в соответствии с выражением (7). Результаты моделирования и расчетов совпали.

Рассмотрим вначале вид ФН $\rho(\tau, dF)$ и их сечений для двух различных девиаций частоты принятого сигнала $\Delta f_{m1} = 426,7$ Гц (рис. 1, а-з) и $\Delta f_{m2} = 4267$ Гц (рис. 1, б-з) при нулевой частотной расстройке ($F=0$) опорного сигнала. С учетом того что радиальное ускорение цели взаимосвязано с девиацией частоты при постоянном времени накопления $T_{\text{кн}}$:

$$a_r = \Delta f_m \lambda / 2T_{\text{кн}},$$

рассмотренные значения девиации частоты для условий моделирования соответствуют радиальному ускорению объекта 25 м/с² и 250 м/с².

Анализируя и сопоставляя рис. 1, а и б, можно сделать два основных вывода:

время запаздывания сигнала на выходе устройства обработки (сжатого сигнала) зависит от расстройки по девиации частоты или, при нефиксированном времени накопления, по скорости изменения частоты. При этом с ростом девиации частоты принятого сигнала такая зависимость становится более слабой;

при относительно больших значениях девиации частоты принятого сигнала тело неопределенности становится многопиковым ("рассыпается") вдоль своего основного гребня.

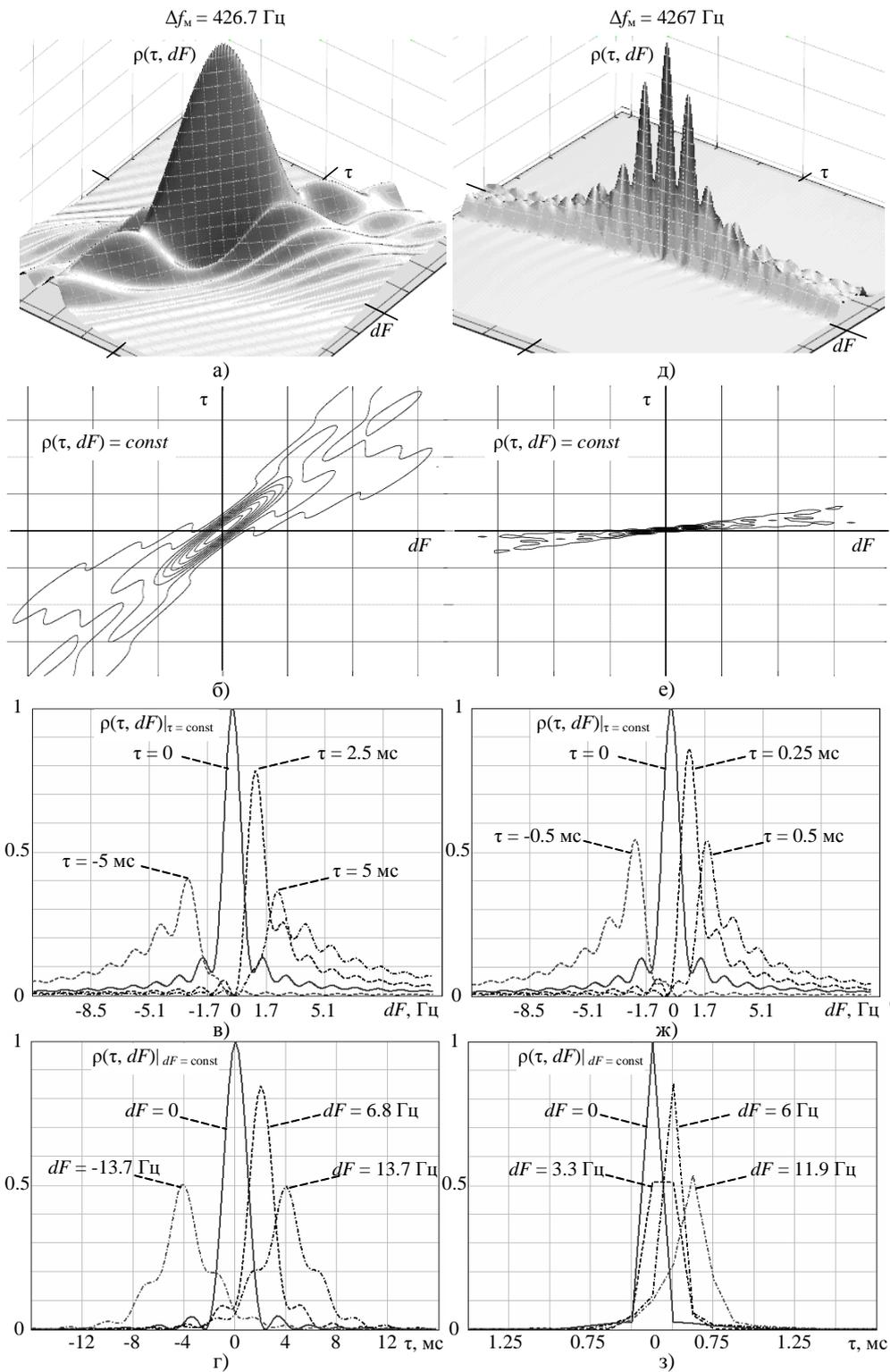


Рис. 1. Вид ФН $\rho(\tau, dF)$ и их сечений для двух различных девиаций частоты ($\Delta f_M=455$ Гц и 4555 Гц) при нулевой частотной расстройке

Выводы подтверждаются сечениями ФН горизонтальной плоскостью, показанными на рис. 1, б и е, а также сечениями вертикальными плоскостями $\tau = \text{const}$ (рис. 1, в и ж) и $dF = \text{const}$ (рис. 1, г и з). Необходимо также отметить, что форма сечения плоскостью $\tau = 0$ определяется соотношением

$$\rho(\tau, dF)|_{\tau=0} = \frac{[c(\sqrt{2T_0 dF})]^2 + [s(\sqrt{2T_0 dF})]^2}{2T_0 dF}$$

и не зависит от Δf_M , а значит, и от ускорения объекта. Ширина этого сечения по уровню 0,5 приближенно может быть оценена как $1,74/T_0$.

Наблюдаемое "рассыпание" ФН при увеличении частотной девиации объясняется фазовыми соотношениями при накоплении в интегрирующем устройстве коррелятора частично демодулированного ЛЧМ сигнала.

Наклон ФН относительно осей τ и dF обусловлен несимметричностью закона модуляции ЛЧМ сигнала отделяющегося от сопровождаемой цели объекта. Обычно частота Доплера сопровождаемой цели скомпенсирована и частота отделяющегося от нее с радиальным ускорением объекта нарастает от нулевого значения (или значения фиксированной промежуточной частоты).

Ширина сечения плоскостью $dF = \text{const}$ определяет вид сжатого сигнала на выходе устройства фильтровой обработки. При $dF = 0$ обработка является согласованной и ширина сечения обратно пропорциональна девиации частоты сигнала.

Величина временных смещений сжатого сигнала при $dF \neq 0$ мала относительно всего времени полета отделяющегося объекта, которое может составлять от единиц секунд до минут. Поэтому такие смещения можно считать полезными в пределах допустимых энергетических потерь, например, 3Дб, что соответствует двукратному уменьшению квадрата модуля амплитуды сжатого сигнала.

Влияние расстройки по частоте Доплера F на вид тела неопределенности проиллюстрировано рис. 2. На нем показаны горизонтальные сечения $\rho(\tau, dF) = \text{const}$ при $F = 15$ Гц для $\Delta f_M = 455$ Гц (рис. 2,а) и $\Delta f_M = 4555$ Гц (рис. 2,б). При ненулевой расстройке F наблюдается смещение ФН $\rho(\tau, dF)$ вдоль оси τ на известную величину $\Delta f_M F / T_0$ [1].

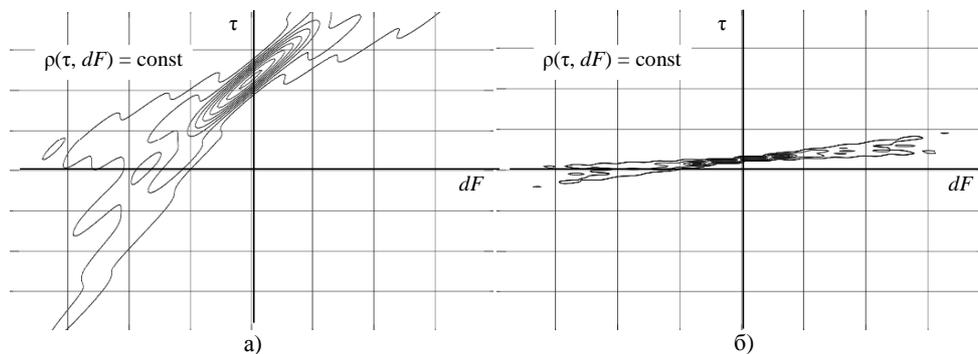


Рис. 2. Обзор по радиальному ускорению в задачах радиолокационного наблюдения отделяющихся объектов

Выбор числа каналов обработки при обзоре по радиальному ускорению

При выборе минимально необходимого для ведения обзора по Δf_M или радиальному ускорению a_r числа параллельных каналов обработки зададимся допустимыми энергетическими потерями 3Дб и пренебрежем смещением оценки вдоль оси τ .

Для определенных выше условий моделирования, максимально допустимые расстройки по радиальному ускорению Δa_r составили:

- при $a_r \leq 100$ м/с² не более 1,6 м/с²;
- при $100 < a_r \leq 135$ м/с² не более 1,5 м/с²;
- при $135 < a_r \leq 170$ м/с² не более 1,4 м/с²;
- при $170 < a_r \leq 200$ м/с² не более 1,1 м/с²;
- при $a_r > 200$ м/с² не более 0,4 м/с².

Если предположить, что диапазон ускорений отделяющегося объекта ограничен сверху 250 м/с^2 (25 g), то потребное число каналов обработки составит 265. Это существенно меньше, чем число каналов, получаемое только лишь с учетом ширины сечения вдоль оси dF при $\tau=0$, равного для условий моделирования $1,74/T_0 \approx 6,8 \text{ Гц}$, что соответствует $0,4 \text{ м/с}^2$ по радиальному ускорению и приводит к необходимости использования 625 каналов.

Дальнейшее уменьшение числа каналов обработки может быть достигнуто уменьшением времени когерентного накопления сигнала при соответствующем снижении отношения сигнал–шум и ухудшении характеристик обнаружения. Так, если в два раза уменьшить время когерентного накопления (до $0,128 \text{ с}$), то по результатам моделирования число потребных каналов обработки можно снизить примерно до 40.

Заключение

Обработка отраженных сигналов от целей, движущихся с постоянным ускорением, сводится к согласованной фильтрации в канале с частотной характеристикой, соответствующей ЛЧМ сигналу с известными параметрами. При отсутствии информации об ускорении необходимо вести обзор пространства по радиальному ускорению. Число параллельных каналов обработки для ведения одновременного обзора определяется соотношением максимального ускорения цели и допустимой взаимной расстройки каналов. Чувствительность каналов обработки к рассогласованию по величине девиации частоты сигнала dF (ускорению цели) и другим параметрам определяется формой четырехпараметрической ФН ЛЧМ сигнала $\rho(\tau, F, \Delta f_m, dF)$. Анализ полученного выражения для функции $\rho(\tau, F, \Delta f_m, dF)$ показал, что рассогласование по девиации частоты приводит к временному смещению максимума огибающей выходного сигнала канала обработки. Так как эти смещения достаточно малы по сравнению со временем наблюдения или могут быть скомпенсированы после оценки ускорения, то диапазон взаимных расстроек каналов может быть увеличен в 3–4 раза, что приводит к сокращению числа необходимых каналов обработки. С ростом абсолютного значения ускорения форма ФН искажается и значения допустимых расстроек уменьшаются.

Существенного сокращения числа потребных каналов обработки можно достичь уменьшением времени когерентного накопления при появлении известных потерь в отношении сигнал–шум. В целом возможен определенный компромисс между аппаратурными затратами и показателями эффективности обнаружителя.

THE RADIAL ACCELERATION SURVEY IN RADAR VISION OF SEPARATED OBJECTS PROBLEM

B. GELILI, S.A. GORSHKOV

Abstract

The form of four-parametrical ambiguity function of CHIRP– signal are considered. Its influence on number of processing channels on radial acceleration is considered too. It is shown, that the number of processing channels can be reduced at displacement on time delay of the detection moment or at reduction of coherent accumulation time.

Литература

1. Ширман Я.Д., Манжос В.Н. Теория и техника обработки радиолокационной информации на фоне помех. М., 1981.
2. Охрименко А.Е. Основы радиолокации и РЭБ. Ч. 1. Основы радиолокации М., 1983.