

## КЛАССИФИКАЦИЯ ИМПУЛЬСНЫХ ЗОНДИРУЮЩИХ ЛОКАЦИОННЫХ СИГНАЛОВ ПО ВИДУ ДИАГРАММЫ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ

*Мрачковский О.Д.*

Со времени появления метода сжатия во времени сигнала с линейной внутримпульсной модуляцией (ЛЧМ) сигнала (chirp-signal), широкое применение нашли различные виды сложных зондирующих импульсов (ЗИ). При этом зондирующие сигналы (ЗС) классифицировались по характеру закона внутри импульсной модуляции (например, сигналы с частотной модуляцией, фазовой манипуляцией, шумоподобные сигналы, различные импульсные последовательности). Такая классификация, систематизирует сигналы с позиции техники их формирования, приводит к бесконечному разнообразию возможных видов ЗИ, которые могут быть использованы в локационных системах и создают такую ситуацию, когда решение задачи аргументированного выбора вида ЗС становится практически невозможным.

Более удобной является классификация ЗИ, если в качестве классификационного признака выбрать функцию неопределенности (ФН) ЗС, являющейся, как известно, обобщенной характеристикой сигнала, характеризующей его совместную потенциальную разрешающую способность по времени (дальности) и доплеровской частоте (скорости).

Необходимо отметить, что в настоящее время известны и используются четыре разновидности ФН: ФН Вудворда [1], взаимная ФН [2], широкополосная ФН [3], обобщенная ФН Урковица [4]. ФН Вудворда пригодна для описания сложных, но относительно узкополосных радиолокационных ЗС. Для отличия будем ее называть «узкополосной» ФН Вудворда. Аналитическая запись ФН Вудворда интерпретирует эффект Доплера как простой частотный сдвиг центральной частоты ЗС:

$$\Omega = \pm 2\pi f_d = \pm 4\pi \frac{V}{c} \cos \theta, \quad (1)$$

где  $\Omega$  - круговая доплеровская частота;  $f_d$  - линейная доплеровская частота;  $V$  - скорость движения объекта локации;  $c$  - скорость распространения электромагнитной энергии;  $\theta$  - угол между вектором скорости и вектором лоцирования.

По определению Вудворда [1], нормированная по энергии ЗС, ФН записывается как пара:

$$\Psi(\tau, \Omega) = \frac{1}{E} \int_{-\infty}^{+\infty} s(t) \cdot s(t - \tau) \cdot e^{j\Omega t} dt \quad (2)$$

$$\overset{\circ}{\Psi}(\tau, \Omega) = \frac{1}{2\pi E} \int_{-\infty}^{+\infty} \dot{S}(\omega) \cdot S^*(\omega - \Omega) \cdot e^{-j\omega\tau} d\omega, \quad (3)$$

где  $s(t)$  - ЗС в аналитической форме;  $s(t - \tau)$  - отраженный сигнал в аналитической форме;  $\dot{S}(\omega), S^*(\omega)$  - спектры зондирующего и отраженного сигналов;  $E$  - энергия ЗС.

В случае использования широкополосных радиолокационных сигналов, для которых отношение центральной частоты к полосе сигнала составляет  $q = \frac{f_0}{W} \leq 0,5\%$  использование «узкополосной» ФН Вудворда, как показано в работах Келли [5,6] не корректно. В этом случае целесообразно использовать так называемую широкополосную ФН (ШФН), которую впервые ввели Гасснер и Купер [7]. В дальнейшем ШФН для различных ЧМ сигналов исследовалась в работах Мрачковского [8-13]. Аналитически ШФН записывается в виде следующей пары:

$$\overset{\circ}{\chi}(\tau, \alpha) = \frac{\sqrt{\alpha}}{E} \int_{-\infty}^{+\infty} s(t) \cdot s\alpha(\alpha t - \tau) \cdot dt \quad (4)$$

$$\overset{\circ}{\chi}(\tau, \alpha) = \frac{1}{2\pi\sqrt{\alpha}E} \int_{-\infty}^{+\infty} \dot{S}(\omega) \cdot S^*\left(\frac{\omega}{\alpha}\right) e^{-j\omega\alpha\tau} d\omega, \quad (5)$$

где  $\alpha = \frac{c - V}{c + V}$  - коэффициент доплеровского транспонирования временного масштаба эхо-сигнала.

Анализ ШФН для гидролокационных сигналов, которые принадлежат к классу широкополосных, был впервые выполнен в работах [8-13]. В этих работах анализу подвергались сложные ЗС с внутри импульсной ЧМ, которые обеспечивают наиболее широкий спектр диаграмм неопределенности (ДН) зондирующих сигналов.

Несмотря на обширную литературу по вопросу анализа и синтеза сложных ЗС, до сих пор вопросы терминологии в этой области во многом остаются спорными, а иногда просто ошибочными. Мы в дальнейшем будем придерживаться ниже приводимых терминов.

Телом неопределенности (ТН) ЗС называется трехмерное изображение модуля нормированной по энергии ФН в координатах время задержки эхо-сигнала, доплеровская частота, модуль ФН,  $\{\tau, f_d, |\Psi_{(\tau, f_d)}|\}$ .

Сечение ТН на уровне  $|\Psi_{(\tau, f_d)}| = const$  называется изокоррелятой ТН.

Изокоррелята на уровне  $|\Psi_{(\tau, f_d)}| = 0,707$ , или  $|\Psi_{(\tau, f_d)}| = 0,5$  называется ДН ЗС. Прямоугольник, описывающий ДН, называется ячейкой разрешения ЗС.

К настоящему времени известны пять разновидностей форм ДН (рис.1),

представляющих собой изокорреляты ФН, полученные на уровне - 3 дБ или - 6 дБ: эллипсоидальная; эллипсоидально-наклонная; X (икс) – образная; V (вэ) – образная; круговая.

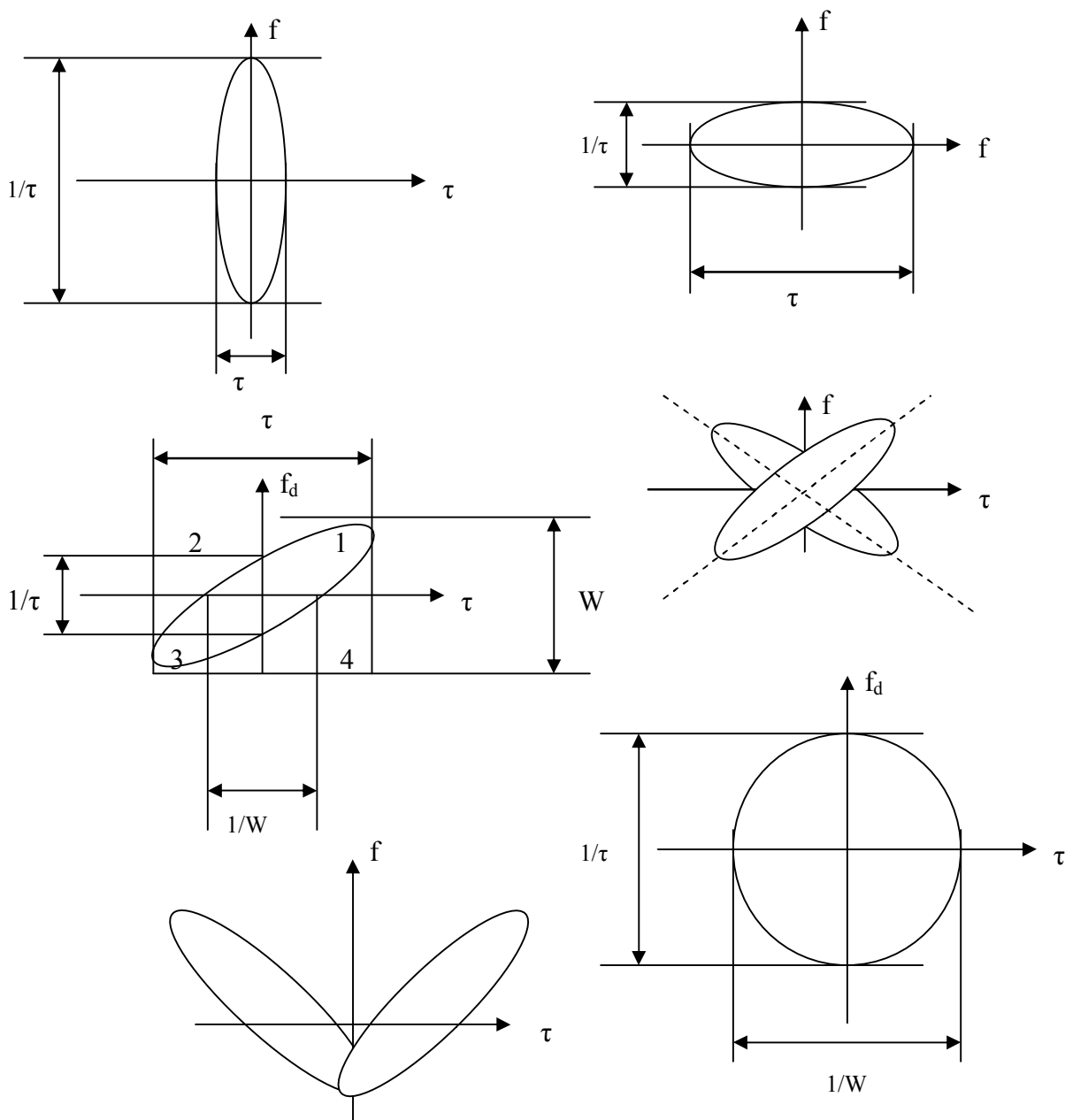


Рис. 1. Классификация импульсных зондирующих сигналов по виду ДН

Вид ДН предопределяет возможность совместной и независимой оценки дальности и скорости обнаруживаемой цели с одного импульса. Указанное качество, в первую очередь, улучшает такую важную тактико-техническую характеристику локационной станции как энергетическую скрытность ее работы. С другой стороны, вид ДН позволяет уменьшить число требуемых доплеровских (скоростных) каналов при обнаружении подвижной цели с одного импульса. Сокращение числа доплеровских каналов приводит к упрощению многоканального по доплеровской частоте

тракта обнаружения эхо-сигнала и уменьшению массогабаритных характеристик этого тракта.

Возникает естественный вопрос, какие ЗС обеспечивают вид ДН?

Для тонального ЗИ, который принадлежит к классу простых сигналов  $B = \tau_u W \leq 1$ , ТН имеет вид насыпного кургана, вершина которого располагается по зениту (траверзу) над началом координат  $\tau - f_0$  плоскости. ДН ФН Вудворда для такого сигнала имеет эллипсоидальную форму. В случае «короткого» тонального сигнала большая ось этого эллипса лежит на оси доплеровских частот  $f_0$ , а малая ось на оси временной задержки  $\tau$ . В случае «длинного» тонального сигнала большая ось эллипса ДН лежит на оси временной задержки  $\tau$ , а малая ось на оси доплеровских частот ФД.

У классического ЛЧМ сигнала ТН представляет собой симметричную горную гряду главный максимум которой располагается в зените (по траверзу) над началом координат  $\tau - f_0$ . Максимумы взаимно корреляционных функций плавно спадают по обе стороны от главного максимума. Проекции этих максимумов на плоскость  $\tau - f_0$  образуют так называемую линию главных максимумов, которая располагается под углом  $\tau - f_0$ . ДН ЛЧМ сигнала представляет собой наклонный эллипс, расположенный под углом плоскости  $\tau - f_0$ . Для сигнала с линейно нарастающей внутриимпульсной частотой ДН располагается во II и IV квадранте плоскости  $\tau - f_0$ . Для сигнала с линейно спадающей внутриимпульсной частотой ДН располагается в I и III квадранте плоскости  $\tau - f_0$ . Размеры ячейки разрешения ЛЧМ сигнала по уровню  $|\Psi_{(\tau, f_0)}| = 0,5$  определяется следующим образом: по оси временной задержки  $\tau$  длительностью ЗС  $\tau_u$ , а по оси доплеровской частоты ФД шириной полосы частот сигнала  $W$ .

ЛЧМ сигнал принадлежит классу так называемых сигналов «одноканальных» по скорости, т. е. допускающий прием эхо-сигнала, имеющего доплеровский сдвиг по частоте в определенных пределах с помощью одного скоростного канала, т.е. одного согласованного фильтра или коррелятора. Принципиальным недостатком такого сигнала является наличие систематической ошибки скорость-дальность, которая может быть устранена при повторном зондировании цели для оценки ее скорости.

Для сигнала с треугольной внутриимпульсной ЧМ ТН представляет собой взаимное пересечение двух фигур типа горной гряды, характерных для ЛЧМ сигнала. Одна из этих фигур располагается наклонно во II и IV квадранте плоскости  $\tau - f_0$ , а другая фигура также наклонно расположена в I и III квадранте этой плоскости. Вершина ТН такого сигнала образует острый пик, который расположен по зениту (траверзу) над началом координат  $\tau - f_0$  плоскости. ДН сигнала с треугольной внутриимпульсной частотной

модуляцією образує кругову ДН в області сильної кореляції і Х - образну фігуру в області слабкої кореляції.

Замечательной особенностью этого сигнала является наличие двух откликов на выходе согласованного фильтра или коррелятора в области средней корреляции. Временной интервал между этими откликами прямо пропорционален скорости цели, а временной интервал между началом зондирования и половиной интервала между этими откликами соответствует дистанции до цели. Таким образом, использование ЛЧМ сигнала с треугольной внутри импульсной модуляцией позволяет получить с одного импульса две независимые оценки: оценку дальности до цели и ее скорости.

Принципиальным недостатком такого сигнала является неоднозначность, связанная с направлением движения цели (цель движется на РЛС или цель движется от РЛС). Для устранения этого недостатка целесообразно использовать ЛЧМ сигнал с трапециидальной внутри импульсной ЧМ.

Для сигнала с внутриимпульсной частотной модуляцией по закону трапеции ТН представляет собой пересечение под острым углом двух фигур в виде горной гряды. Вершина этого пересечения обычно находится на оси доплеровских частот ФД вблизи начала координат  $\tau - f_0$  плоскости. ДН такого сигнала V - образная эллипсоидальные лепестки которой пересекаются под острым углом. Вершина этого угла располагается на доплеровской оси частот. Для ЛЧМ сигнала с внутриимпульсной ЧМ по закону прямой трапеции эллипсоидальные лепестки располагаются в III и IV квадранте  $\tau - f_0$  плоскости, для ЛЧМ сигнала в внутри импульсной ЧМ по закону обратной трапеции эллипсоидальные лепестки располагаются в I и II квадранте этой плоскости. Такое расположение эллипсоидальных лепестков позволяет получить независимую оценку дальности и скорости цели с одновременной информацией о направлении движения цели.

Для сигнала с внутриимпульсной ЧМ по закону квадратичной параболы ТН подобно телу неопределенности для сигнала с треугольной внутриимпульсной ЧМ. ДН такого сигнала характеризуется двумя областями: областью сильной и слабой корреляции. В области сильной корреляции ДН круговая. В области слабой корреляции ДН Х - образная.

Идеальной ДН, с точки зрения совместной и независимой оценки дальности и скорости цели, обладают сигналы, имеющие «кнопкообразную» ФН, сечение которой на уровне - 3 дБ, или - 6 дБ образуют круговую ДН.

Круговой ДН в классе ЧМ сигналов обладает сигнал с параболической внутриимпульсной ЧМ, а также сигналы модулированные по закону функций Эрмита [14]. Такой же ДН обладает очень широкий класс фазокодоманипулированных (ФКМ) сигналов с использованием кодов Хаффмена, последовательностей Лежандра и Якоби, нелинейных и дополнительных последовательностей, кодов Ипатова [15].

Круговой вид ДН является единственным, который с одного импульса

позволяє отримати незалежну оцінку дальності та швидкості цілі. Відзначимо, що в залежності від вибраної величини тривалості  $\tau_u$  та ширини смуги частот  $W$  ФКМ сигналу змінюється вигляд ДН [16]. Звичайна для нас кругова ДН стає еліпсоїдальною. Для «довгого» ФКМ сигналу більша вісь еліпса розташована на осі  $\tau$  в  $\tau - f_d$  площині та навпаки, більша вісь еліпса розташована на осі  $f_d$  в  $\tau - f_d$  площині з збільшенням ширини смуги частот ФКМ сигналу. Таким чином, отримуємо ДН типову для простих сигналів, хоча аналізуємо клас складних ФКМ сигналів. На практиці це призводить до того, що «довгий» ФКМ сигнал має високу потенціальну роздільну здатність за швидкістю та низьку за дальністю, та навпаки, «короткий» ФКМ сигнал має високу потенціальну роздільну здатність за дальністю та низьку за швидкістю.

Пропонується класифікація зондувальних сигналів за виглядом їх ДН зберігається як для вузькополосних радіолокаційних сигналів, так і для широкополосних радіолокаційних та гідролокаційних сигналів.

ДН гідролокаційних сигналів центральні частоти яких зазвичай лежать в діапазоні від 0,5 до 200 кГц в більшості випадків належать до класу широкополосних сигналів. ДН зондувальних гідролокаційних сигналів відрізняється від ДН вузькополосних радіолокаційних сигналів розмірами комірок роздільності зондувального сигналу [10-13].

Відзначимо, що використання ЧМ зондувальних сигналів з Х (ікс) образної та V (вэ)-образної ДН в радіолокації неприпустимо при виявленні множини цілей, створюють масив відповідей з невідомими параметрами відліків. Використання таких сигналів в гідролокації можливо, оскільки наявність множини цілей в разі гідролокаційного виявлення малоймовірно.

Пропонувана класифікація складних зондувальних сигналів за виглядом ДН корисна при евристичному виборі вигляду зондувального сигналу, в разі виявлення цілі на фоні білого та окрашеного шуму.

#### **Література**

1. Вудворд Ф.М. Теорія ймовірностей та теорія інформації з застосуванням в радіолокації, М.: Радіо і зв'язок, 1955, с.
2. Мрачковський О.Д., Дронкін Е.І. Про об'єм взаємної та узагальненої функції невизначеності, Труды VI Всесоюзної школи семінара по статистичній гідрокістиці, Новосибірськ, 1975, с. 137-139.
3. Speiser R.L., Wide-Band Ambiguity Functions.//IEEE Trans.v.IT-13, 1967, №1, p.122÷123.
4. Урковиц, Хауер, Коваль. Узагальнена роздільна здатність радіолокаційних систем, ТИРИ, 1962, №10, с. 21-39.
5. Келлі, Вішнер. Теорія узгодженої фільтрації цілей, що рухаються прискорено з високими швидкостями. Зарубіжна радіоелектроніка, 1965, №2.

6. Мрачковский О.Д., Олейник О.О. О деградации функции неопределенности широкополосного ЛЧМ сигнала. Вісник НТТУ «КПІ» Серія: Радіотехніка. Радіоапаратобудування, 2008, вип.38 (в печати).

7. Gassner R.L., Cooper G.R. Note on a Generalized Ambiguity Functions IEEE Trans, vol IT-13, №1, 1967.

8. Мрачковский О.Д., Дронкин Э.И. К вопросу о принципе неопределенности в гидролокации. // Вопросы кораблестроения. Серия: Специальная гидроакустика, 1974 вып.5.

9. Мрачковский О.Д. Анализ, формирование и обработка сложных ЧМ сигналов, используемых АРГАС. Отчет киевского НИИ гидроприборов, 1976.

10. Мрачковский О.Д. Анализ функции неопределенности широкополосного ЛЧМ сигнала. Вестник КПИ. Серия: Радиотехника и электроакустика, 1974, вып.11.

11. Мрачковский О.Д. Анализ функции неопределенности широкополосного ГЧМ сигнала. // Вестник КПИ. Серия: Радиотехника и электроакустика, 1976, вып.13.

12. Мрачковский О.Д. Анализ функции неопределенности широкополосного КЧМ сигнала. Вестник КПИ. Серия: Радиотехника и электроакустика, 1977, вып.11.

13. Мрачковский О.Д. Анализ функции неопределенности широкополосного ТЧМ сигнала // Вестник КПИ. Серия: Радиотехника и электроакустика, 1975, вып.12.

14. Кук Ч., Бернфельд М. Радиолокационные сигналы, М.: «Советское радио», 1971, 567с.

15. Ипатов В.П., Камалетдинов Б.Ж., Самойлов И.М. Дискретные последовательности с хорошими корреляционными свойствами. // Зарубежная радиоэлектроника. 1989. №9.

16. Мрачковский О.Д., Ольшевский О.О. Дослідження потенційних характеристик радіолокаційного сигналу, фазоманіпульованого кодом Баркера в області слабкої кореляції // Вісник НТУУ «КПІ». – Сер. Радіотехніка. Радіоапаратобудування.-2007. - Вип.35. -С.46-48.

*Мрачковский О.Д. Классификация импульсных зондирующих локационных сигналов по виду диаграммы неопределенности. Предложена классификация сложных зондирующих импульсных сигналов по виду диаграммы неопределенности. Такой подход полезен при эвристическом выборе вида зондирующего сигнала в случае обнаружения цели на фоне белого и окрашенного шума.*

**Ключевые слова:** функция неопределенности, диаграмма неопределенности, внутримпульсная частотная модуляция, фазокодоманипулированный сигнал.

*Мрачковський О.Д. Класифікація імпульсних зондуючих локаційних сигналів по виду діаграми невизначеності. Запропонована класифікація складних зондуючих імпульсних сигналів за видом діаграми невизначеності. Такий підхід корисний при евристичному виборі зондуючого сигналу у випадку виявлення цілі на фоні білого та небілого шуму.*

**Ключові слова:** функція невизначеності, діаграма невизначеності, внутрішньоімпульсна частотна модуляція, фазокодоманіпульований сигнал.

*Mrachkovsky O.D. Classification of the pulse radar signal by ambiguity function. The classification of composite sounding signals by the form of ambiguity function is offered. Such approach is friend by heuristic selection of a sounding signal in case of target acquisition on a background of a white noise and not white noise.*

**Key words:** ambiguity function, differential PCM, pulse frequency modulation.