

УДК 621.396.96

Г.В. Ермаков, И.В. Норинчак, Д.С. Калугин, Д.М. Литовченко

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФУНКЦИИ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ПАЧКИ СВЕРХШИРОКОПОЛОСНЫХ СИГНАЛОВ

Предложен метод обзора пространства в случае использования сверхширокополосных сигналов, рассмотрена методика расчета многомерной функции неопределенности пачки видеоимпульсов, излучаемых активной антенной решеткой, и проанализированы ее свойства.

Введение и анализ литературы

Повышение интереса к возможностям сверхширокополосной (СШП) радиолокации продиктовано тем, что при определенных условиях традиционные РЛС не могут на высоком качественном уровне решать такие задачи радиолокационного наблюдения, как обнаружение низколетящих и малозаметных целей, однозначное измерение скорости и дальности малоразмерных целей, построение радиоизображений лоцируемых объектов [1, 2].

Актуальность исследований

Эффективность современных РЛС во многом зависит от их способности определять местоположение и скорость цели в пространстве с достаточно высокой точностью. Поэтому актуальной является необходимость поиска радиолокационных сигналов с функцией неопределенности (ФН), обладающей достаточно низким уровнем боковых лепестков (побочных максимумов) и явно выраженным узким главным пиком [3]. Кроме этого, в условиях применения различного рода активных помех, противорадиолокационных ракет от точности и своевременности целеуказания при разнесенном приеме–передаче зависит живучесть зенитно-ракетных комплексов.

Необходимо отметить, что синтез радиолокационных сигналов с оптимальным строением тела неопределенности в областях расстроек по дальности, углам и скорости представляет собой достаточно сложную задачу. Одним из возможных направлений исследований является использование СШП сигналов видеоимпульсного типа наносекундной длительности. Определение дальности, скорости и углового положения объектов с помощью таких сигналов обладает рядом особенностей, связанных с малым разрешающим объемом по дальности, возможностью работы по неподвижным целям (отсут-

ствии доплеровского сдвига), способом обзора пространства.

Цель статьи – определение и расчет ФН пачки СШП сигналов и анализ ее свойств.

Изложение основного материала

При определении тела неопределенности СШП сигналов целесообразно рассматривать процесс генерации, излучения и приема в совокупности, поскольку антенная система в силу своих дисперсионных свойств будет оказывать влияние на результаты обработки любого немонахроматического сигнала. В свою очередь абсолютная ширина спектра излучаемого сигнала влияет на направленные характеристики антенны. Степень этого влияния можно оценить с помощью пространственно-частотной корреляционной функции (ПЧКФ):

$$\Psi(\Delta\tau, \Delta V, \Delta\Theta, \Delta\varphi) = \left| \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \dot{S}(\omega) \dot{S}^*(\omega, t - \Delta\tau) \times \right. \\ \left. \times H_3(\omega, \Delta\Theta, \Delta\varphi) \exp\left(j\omega \frac{2\Delta V}{c} t\right) dt d\omega \right|, \quad (1)$$

где $\Delta\tau, \Delta V, \Delta\Theta, \Delta\varphi$ – рассогласования по дальности, скорости и угловым координатам соответственно;

$\dot{S}(\omega)$ – спектральная плотность зондирующего сигнала;

$\dot{S}(\omega, t - \Delta\tau)$ – комплексно-сопряженная спектральная плотность принимаемого сигнала с учетом рассогласования по дальности;

$H_3(\omega, \Delta\Theta, \Delta\varphi)$ – пространственно-частотная характеристика антенны;

c – скорость света;

ω – циклическая частота.

Для анализа ПЧКФ (1) необходимо определить с типом антенной системы, а также способом обзора пространства. В случае использования СШП сигналов последовательный обзор пространства на передачу и прием является малопримлемым, поскольку может привести к "импульсному голоду". В силу этого параллельный обзор является более подходящим и легкорезализуемым при помощи активных антенных решеток (ААР). При этом необходимо, однако, выполнение условия ортогональности (некоррелированности) передающих каналов, т.е. излучаемые сигналы не должны интерферировать между собой:

$$r_{mn} = \int \dot{S}_m \left(t + \frac{md}{c} \sin \Theta \right) \times \dot{S}_n \left(t + \frac{nd}{c} \sin \Theta \right) dt = \begin{cases} 1 & \text{при } m = n \\ 0 & \text{при } m \neq n, \end{cases} \quad (2)$$

где m, n – номера каналов;

d – шаг решетки;

Θ – угол места точки наблюдения.

Простым способом обеспечения ортогональности СШП сигналов является неодновременность их излучения в пространство элементами ААР.

Предположим, что ААР имеет M элементов. При выполнении условия ортогональности ($\tau_n \ll T$, где τ_n – длительность СШП сигнала; T – период повторения излучаемых сигналов в пачке) каждый из N сигналов пачки будет излучаться в широкую область пространства, соответствующую парциальной диаграмме излучателя.

Для накопления энергии отраженных сигналов необходимо организовать оптимальную пространственно-временную обработку для $M \times N$ ожидаемых направлений, что эквивалентно многолучевому диаграммообразованию. Поскольку каждый излученный СШП сигнал пачки в силу неодновременности излучения, малой разрешающей способности по дальности и наличия радиальной скорости отражается от разных точек цели, то "узость" диаграмм направленности на прием может быть обеспечена за счет учета смещения центров излучения сигналов по пространству, что эквивалентно алгоритму синтеза апертуры (СА).

Формальное сходство с традиционной системой с СА [4] обусловлено тем, что неодновременное излучение сигналов передающей ААР можно рассматривать как движение передатчика с радиальной ско-

ростью $V_r = d \sin \Theta / T$.

Следуя [3] предположим, что режим приема в измерительных СШП системах будет построен следующим образом:

1. В качестве приемной антенны можно использовать слабонаправленную одиночную антенну, направленность которой согласована с направленностью передающей ААР.

2. Пространственно-временная обработка на выходе должна учитывать смещение центров излучения по пространству, момент излучения, а также временную структуру принимаемого сигнала.

3. Также как и в системах с СА, необходимо учитывать изменение дальности до объекта за время обзора.

Пусть в дальней зоне ААР находится неискажающая сигнал цель, движущаяся с радиальной скоростью V_r . При использовании пачки, состоящей из N СШП сигналов, излучаемых M -элементной ААР, с учетом ортогональности излученных сигналов на выходе приемной антенны m -й импульс зондирования, приведенный к длительности СШП сигнала τ_i , будет иметь вид

$$S_n^m(t^{np}, \tau, V_r, \Theta) = S_0 \left[t - \tau - (n + m) \Phi(T_0, V_r, \Theta) \right], \quad (3)$$

где $t^{np} = \frac{t}{\tau_i}$ – приведенное время;

$\tau = \frac{2R}{c\tau_i}$ – приведенное время задержки сигнала;

$n = 1 \dots N$ – номер импульса в пачке;

$m = 1 \dots M$ – номер элемента ААР;

$\Phi(T_0, V_r, \Theta) = \left(1 + \frac{2V_r}{c} \right) \frac{T_0}{\tau_i} + \frac{d}{c\tau_i} \sin \Theta$ – функ-

ция, учитывающая частотно-временное преобразование длительности сигнала и длительности пачки для движущейся цели;

T_0 – период принятой последовательности;

d – шаг решетки.

По всей видимости, после излучения m -м каналом ААР пачки СШП сигналов будет приниматься пачка импульсов с периодом, зависящим от частоты повторения, скорости цели и угловых координат наблюдаемого объекта. Для исследования системы с неразделяющимися пространственными и временными координатами необходимо переходить к построению и анализу свойств многомерных ФН в

координатах "дальность – скорость – угол" [4]. В данном случае ФН, как и всякая функция рассогласования, определяет относительную реакцию системы на отклонение указанных параметров от ожидаемых значений дальности, скорости, угла, с которыми согласовано устройство обработки.

Учитывая, что период принимаемой последовательности T_0 линейно связан с радиальной скоростью V_r и угловой координатой ($\sin \Theta$) и совместно с τ_0 является информационным параметром, подлежащим оценке, представим пачку принимаемых СШП сигналов (3) в виде

$$S_0(t|\tau_0, T_0) = \sum_{i=0}^{M \times N} S_0(t - \tau_0 - iT_0). \quad (4)$$

Предположим, что за время наблюдения T_H на вход приемной системы поступит смесь полезного сигнала и гауссового шума $n(t)$ с нулевым средним значением и спектральной плотностью $\frac{N_0}{2}$:

$$\begin{aligned} x(t) &= S_0(t|\tau_0, T_0) + n(t) = \\ &= \sum_{i=0}^{M \times N} S_0(t - \tau_0 - iT_0) + n(t). \end{aligned} \quad (5)$$

Оптимальный приемник формирует логарифм функционала правдоподобия параметров τ, T [5]:

$$\begin{aligned} L(\tau, T) &= \frac{2}{N_0} \int_0^{T_H} x(t) S_0(t|\tau, T) dt - \\ &- \frac{1}{N_0} \int_0^{T_H} S_0^2(t|\tau, T) dt. \end{aligned} \quad (6)$$

Подставляя (5) в (6) и нормируя полученный результат на энергию импульса $e = \int_0^{T_H} S_0^2(0,0) dt$, получим

$$L(\tau, T) = q_0^2 [S(\tau_0, \tau; T_0, T)] + q_0 N(\tau, T), \quad (7)$$

где $q_0^2 = \frac{2e}{N_0}$ – энергетическое соотношение сигнал–шум;

$$S(\tau_0, \tau; T_0, T) = \frac{1}{e} \sum_{m=1}^{M \times N} \sum_{n=1}^{M \times N} \int_0^{T_H} S_0(t - \tau_0 - mT_0) \times$$

$$\times S_0(t - \tau - nT) dt =$$

$$= \sum_{m=1}^{M \times N} \sum_{n=1}^{M \times N} \Psi(\tau_0 - \tau + mT_0 - nT_0) - \quad (8)$$

обобщенная ФН пачки СШП сигналов;

$$N(\tau, T) = \frac{\int_0^{T_H} n(t) S(t|\tau, T) dt}{\sqrt{eN_0/2}} - \text{шумовая функция}$$

статистики на выходе оптимального приемника.

В предложенном алгоритме (7) оптимальная обработка предполагает сочетание пространственного накопления импульсов с временным. Поэтому возможны, в принципе, две различные схемы, представленные в [3].

В первом варианте предполагается корреляция принятой реализации с опорными $M \times N$ сигналами, где N – необходимое количество скоростных каналов в каждом угловом канале.

Второй вариант построения системы обработки предполагает вычисление корреляционного интеграла после компенсации временного запаздывания (создания канала приема, настроенного на скорость V_r и угол Θ) и суммирования сигналов в углоскоростных каналах приема, наличие которых можно пояснить следующим образом: рассогласование по скорости можно представить как изменение времени заполнения СА, а рассогласование по углу – как изменение периода повторения импульсов.

Для определения ФН (8) зададимся временной структурой СШП сигнала в виде [6]

$$\begin{aligned} S_0(t) &= E_0 (t/T_s)^p \left\{ Q^{p+1} \exp[-(Qt/T_s)^b] - \right. \\ &\left. - \exp[-(t/T_s)^b] \right\} H(t), \end{aligned} \quad (9)$$

где E_0 – нормирующий множитель;

$H(t)$ – единичная функция Хевисайда.

В модели (9) имеющий размерность времени параметр T_s и безразмерные величины $Q > 1, b > 1, p > 1$ влияют как на форму, так и на длительность СШП импульса. Для модели (9) выполняется равенство нулю спектра на нулевой частоте и сохраняются преимущества, связанные с ее соответствием интуитивно ожидаемому виду начального импульса на выходе антенной системы.

Сечения тела неопределенности для ААР, состоящей из 5 элементов, и пачки, состоящей из 10

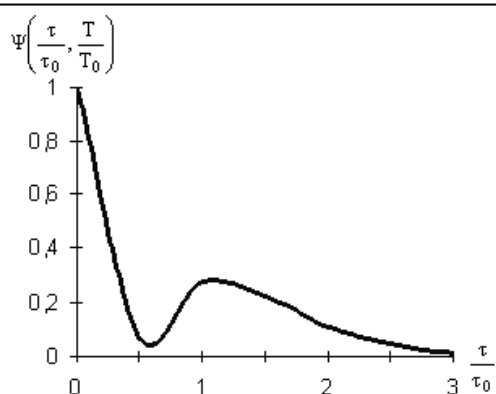


Рис. 1. Сечение тела неопределенности по дальности

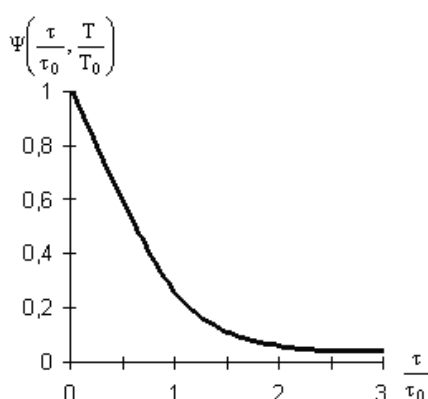


Рис. 2. Сечение тела неопределенности по периоду

сигналов по координатам $\frac{\tau}{\tau_0}$ и $\frac{T}{T_0}$, представлены на рис. 1, 2 соответственно.

Анализ рис. 1 показывает, что форма тела неопределенности в сечении "дальность" повторяет форму одиночного СШП сигнала, побочные пики отсутствуют, что связано с ортогональностью излучаемых сигналов. При уменьшении периода повторения импульсов в пачке возникают дополнительные пики, отрицательно влияющие на надежность оценок дальности, скорости и угла.

Анализ рис. 2 показывает обобщенную зависимость амплитуды сигнала в углоскоростном канале. В силу пропорциональности этой амплитуды энергии сигнала, на рис. 2 изображена пиковая энергетическая диаграмма направленности ААР, имеющая безлепестковую структуру и ширину 5° по уровню 0,5.

Вывод

Таким образом, предложенная в работе схема определения ФН пачки СШП сигналов, позволяет синтезировать схему оптимальной обработки принимаемой реализации, а также оценить точностные свойства разнесенной антенной системы при параллельном обзоре пространства.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Осипов М.Л. Сверхширокополосная радиолокация // Радиотехника. – 1995. – № 3. – С. 3–6.
2. Бункин Б.В., Кашин В.А. Особенности, проблемы и перспективы субнаносекундных видеоимпульсных РЛС // Радиотехника. – 1995. – № 4–5. – С. 128 – 132.
3. Вовшин Б.М. Сверхширокополосная видеоимпульсная система с синтезированной апертурой для параллельного обзора пространства // Радиотехника и электроника.– 1999. – Т. 44, № 12. – С. 1479–1486.
4. Пространственно-временная обработка сигналов / Под ред. И.Я. Кремера. – М.: Радио и связь, 1984. – 184 с.
5. Теоретические основы радиолокации: Учебн. пособие для вузов / Под ред Я.Д. Ширмана. – М.: Сов. радио, 1970. – 560 с.
6. Стадник А. М., Ермаков Г.В. Атмосферные искажения сверхширокополосных импульсов ультракороткой длительности // Радиофизика и радиоастрономия. – 2000. – Т. 5, № 2. – С. 125 – 131.

Поступила 27.05.2005

Рецензент: д-р воен. наук профессор В.Д. Карлов, Харьковский университет Воздушных Сил.