

ФУНКЦИИ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ПАЧЕК СВЕРХШИРОКОПОЛОСНЫХ ИМПУЛЬСОВ

Чанурский В.В.

МГТУ им. Н.Э. Баумана, vcchapursky@rslab.ru

Рассматриваются модели сверхширокополосных пачечных сигналов, состоящих из конечной последовательности видеоимпульсов произвольной формы с постоянным периодом повторения. С помощью обобщенного выражения для функции неопределенности по задержке и скорости, справедливого для любых сверхширокополосных сигналов, получено общее выражение для функции неопределенности пачки сверхширокополосных импульсов и приведены примеры ее расчета и оценки разрешающей способности для различных параметров пачки и видов видеоимпульсов.

Введение

В последнее десятилетие сверхширокополосные (СШП) видеоимпульсные сигналы (ВИС), первоначально широко использовавшиеся в радиолокаторах подповерхностного зондирования, находят все большее применение при решении задач ближней радиолокации. К ним можно отнести обнаружение и наблюдение малоскоростных и малоподвижных объектов: людей за оптически непрозрачными препятствиями при проведении антитеррористических и спасательных операций, дистанционный мониторинг дыхания и сердцебиения человека в медицинских и смежных областях, контролирование положения объектов на летном поле аэродромов, на железнодорожном транспорте, в задачах охраны важных объектов и т.п.

Не смотря на давнюю предысторию исследований, ряд важных аспектов теории, актуальных для ближней видеоимпульсной радиолокации, остался без внимания. В первую очередь это относится к выводу и анализу функции неопределенности (ФН) по задержке и скорости для пачек радиолокационных сигналов на основе последовательности СШП видеоимпульсов (ВИ). Для таких сигналов понятие частоты Доплера заменяется понятием преобразования временного масштаба сигналов, приводящего к растяжению или сжатию отраженных от цели СШП ВИС. Соответственно оптимальная обработка принятых СШП сигналов производится путем корреляции с опорными СШП сигналами, полученными из зондирующего сигнала путем задержки на линии задержки (ЛЗ) и преобразования временного масштаба в специальном устройстве – компандере [1]. Для пачечных СШП ВИС преобразование временного масштаба приводит к изменению периода повторения ВИ, что в свою очередь может означать сокращение числа перекрываемых по времени ВИ в принимаемой и опорной пачках вследствие малой длительности одиночных ВИ. Этот эффект сказывается на форме лепестков ФН и на оценках разрешающей способности по скорости.

Общие выражения для ФН пачек СШП импульсов в литературе отсутствуют. Поэтому в данном докладе общее выражение ФН СШП сигналов по задержке и скорости конкретизируется для пачек из конечного числа СШП импульсов. При этом для удобства графического представления ФН с учетом крайне малого отношения длительности СШП импульсов к периоду их повторения вводится понятие сжатой по задержкам ФН, в которой сжатие относится только к уменьшению интервалов между последовательными максимумами ФН, но не к их ширине. Количественные примеры расчета сечений ФН и анализ разрешающей способности по скорости и задержке приводились для представляющих наибольший практический интерес видов СШП видеоимпульсов в пачке: несимметричного моноцикла с нулевой постоянной составляющей и полициклического СШП импульса с двумя квадратурами.

1. Математические модели пачек зондирующих и принимаемых СШП видеоимпульсов.

Предположим, что зондирующий СШП сигнал $\dot{s}(t)$, представляемый для общности в комплексной форме, начинает излучаться в момент времени $t = 0$ и имеет вид пачки из $N+1$ ВИ $\dot{s}_0(t)$ с периодом повторения T :

$$\dot{s}(t) = \sum_{n=0}^N \dot{s}_0(t - nT). \quad (1)$$

ВИ в пачке в комплексной форме запишем в простейшем виде:

$$\dot{s}_0(t) = s_0(t) \exp(j\omega_0 t). \quad (2)$$

Такая форма отличается от представления аналитического сигнала с помощью преобразования Гильберта. Однако это не является существенным для данного исследования, но позволяет просто переходить от действительного ВИ в форме несимметричного моноцикла к СШП ВИ, содержащему за время его длительности несколько циклов колебаний частоты ω_0 . Для одиночного ВИ $s_0(t)$ в виде моноцикла хорошо подходит аппроксимация [2]:

$$s_0(t) = \exp\left(-4\pi\left(t/\tau_{imp}\right)^2\right) - g^{-1} \exp\left(-4\pi\left((t - \tau_{imp})/(g\tau_{imp})\right)^2\right), \quad (3)$$

где $g > 1$ - постоянный коэффициент, регулирующий амплитуду и длительность отрицательного выброса ВИ; τ_{imp} - длительность положительной части ВИ. Пример формы ВИ $s_0(t)$, а также ВИ $\text{Re}[\dot{s}_0(t)]$ и $\text{Im}[\dot{s}_0(t)]$ при $\tau_{imp} = 10$ нс, $g = 3$ и $\omega_0 = 4\pi \cdot 10^8$ показан на рис. 1.

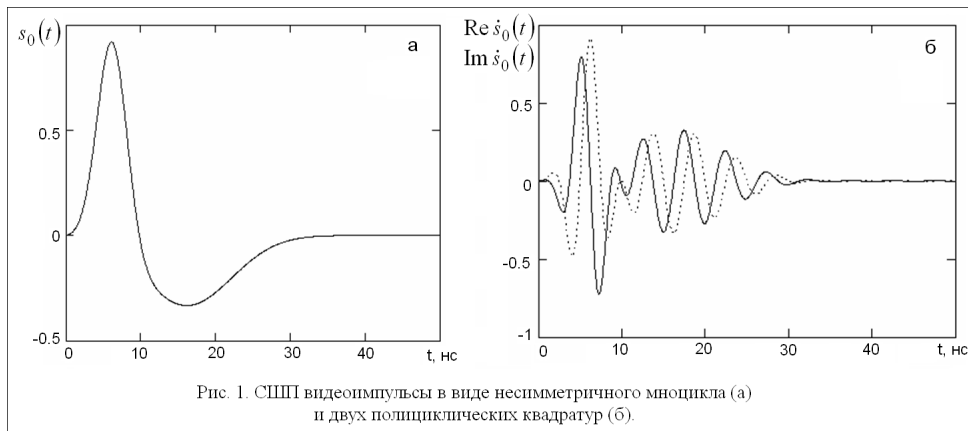


Рис. 1. СШП видеоимпульсы в виде несимметричного моноцикла (а) и двух полициклических квадратур (б).

Пусть сигнал (1) отражается от точечной цели, расстояние $r(t)$ которой от РЛС изменяется по линейному закону с постоянной радиальной скоростью v :

$$r(t) = r_0 + vt. \quad (4)$$

Здесь r_0 - это расстояние до цели в момент начала излучения зондирующего сигнала при $t = 0$. Принимаемый РЛС отраженный сигнал, в том числе СШП, может быть записан в виде [3]:

$$\dot{s}_{rec}(t) = A \cdot \dot{s}[(1 + \alpha)(t - \tau)], \quad (5)$$

где задержка $\tau = 2r_0/c$, c - скорость света, A - множитель, обусловленный затуханием, а значение $(1 + \alpha) = \frac{c+v}{c-v} = a$ представляет собой коэффициент сжатия (растяжения) отраженного

СШП сигнала. Выражение (5) является точным, однако обычно достаточно использовать линейную зависимость $\alpha \approx 2v/c$ от скорости v , поскольку удовлетворяется неравенство $v \ll c$, и параметр α приобретает смысл нормированной скорости цели. Таким образом, принимаемый СШП сигнал, как обычно, зависит от двумерного вектора параметров задержка – скорость $\vec{\mu} = \|\tau, \alpha\|$. Для опорного сигнала в системе корреляционной обработки компоненты вектора параметров $\vec{\mu}_0 = \|\tau_0, \alpha_0\|$ имеют значения, отличные от аналогичных компонент в принимаемом сигнале:

$$\dot{s}_{ref}(t) = \dot{s}[(1 + \alpha_0)(t - \tau_0)], \quad (6)$$

С учетом (1) выражения для пачек (5) и (6) получаются в виде

$$\dot{s}_{rec}(t) = A \cdot \sum_{n=0}^N \dot{s}_0[(1 + \alpha)(t - \tau) - nT], \quad \dot{s}_{ref}(t) = \sum_{n=0}^N \dot{s}_0[(1 + \alpha_0)(t - \tau_0) - nT]. \quad (7)$$

Графическое представление СШП пачечных сигналов (1) и (7) на всей длительности пачки с высокой детализацией каждого одиночного ВИ и их относительных положений в принимаемой и опорной пачках (7) крайне затруднительно из-за малых, наносекундных длительностей ВИ и реальных периодов повторения T от единиц до сотен микросекунд.

Анализ формул (7) показывает, что наличие скорости цели приводит к некоторому незначительному сжатию (растяжению) по времени формы одиночных ВИ наносекундой длительности. Более существенным фактором является абсолютное изменение периода повторения импульсов в пачке. Абсолютная величина сдвига n -ого импульса в принимаемой пачке относительно ее начала пропорциональна его удалению от начала пачки, приближенно равна величине αnT и может заметно превосходить длительность одиночного СШП ВИ, равную на рис.1 $t_{imp} \approx 4\tau_{imp}$. Это обстоятельство, естественно, отражается на форме двумерной ФН пачки СШП ВИ в координатах «задержка – скорость».

2. Определение функции неопределенности пачки СШП видеоимпульсов.

Для определения многомерной ФН по задержкам и скоростям для пары векторов $\vec{\mu} = \|\tau, \alpha\|$ и $\vec{\mu}_0 = \|\tau_0, \alpha_0\|$ в принимаемой и опорной СШП сигналах рассчитывают взаимно корреляционный интеграл этих сигналов [1]:

$$\chi(\vec{\mu}, \vec{\mu}_0) = \int_{-\infty}^{\infty} \dot{s}((1+\alpha)(t-\tau)) \dot{s}^*((1+\alpha_0)(t-\tau_0)) dt, \quad (8)$$

где * означает комплексное сопряжение. Собственно ФН обычно определяют в виде модуля $|\chi(\vec{\mu}, \vec{\mu}_0)|$. Функцию четырех переменных $\chi(\vec{\mu}, \vec{\mu}_0)$ заменой переменной интегрирования можно с точностью до постоянного множителя свести к функции двух переменных a и θ :

$$\chi(\theta, a) = \int_{-\infty}^{\infty} \dot{s}(t) \dot{s}^*(a(t-\theta)) dt. \quad (9)$$

Здесь $a = \frac{1+\alpha_0}{1+\alpha}$, $\theta = (1+\alpha)(\tau_0 - \tau)$, и за счет малости α и α_0 справедливы приближения $a \approx 1 + \beta$ при $\beta = \alpha_0 - \alpha$ и $\theta \approx \tau_0 - \tau$. Подставляя в (9) выражение (1) и учитывая ограниченность длительности ВИ $0 < t < t_{imp}$, после дополнительной замены переменных и преобразований можно получить формулу для $\chi(\vec{\mu}, \vec{\mu}_0)$, содержащую функции одиночных ВИ:

$$\chi(\theta, \beta) = \int_0^{t_{imp}} \dot{s}_0(t) \left\{ \sum_{n_1, n_2=0}^N \dot{s}_0^*[(1+\beta)(t-\theta) + T((1+\beta)n_1 - n_2)] \right\} dt. \quad (10)$$

Анализ структуры формулы (10) показывает, что ФН $|\chi(\theta, \beta)|$ является суммой узких по переменной θ компонент $\chi_m(\theta, \beta)$ в количестве $2N + 1$:

$$|\chi(\theta, \beta)| = \left| \sum_{m=-N}^N \chi_m(\theta, \beta) \right|. \quad (11)$$

Выражение для компонент $\chi_m(\theta, \beta)$ имеет вид:

$$\chi_m(\theta, \beta) = \begin{cases} \int_0^{t_{imp}} \dot{s}_0(t) \left\{ \sum_{n=0}^{N-m} \dot{s}_0^*[(1+\beta)(t-\theta) + T(n\beta - m)] \right\} dt, & \text{при } m \geq 0, \\ \int_0^{t_{imp}} \dot{s}_0(t) \left\{ \sum_{n=0}^{N-|m|} \dot{s}_0^*[(1+\beta)(t-\theta) + T(n\beta + (1+\beta)|m|)] \right\} dt, & \text{при } m < 0, \\ 0, & \text{если } \theta \notin [mT - t_{imp}, mT + t_{imp}] \end{cases} \quad (12)$$

По оси θ при $\beta = 0$ эти компоненты разделены интервалами длиной T и сосредоточены вблизи точек их локальных максимумов $\theta_m = mT$ при целочисленных значениях m , удовлетворяющих неравенству $|m| \leq N$. Ширина компонент $\chi_m(\theta, \beta)$ по оси θ при $\beta = 0$ дается величиной порядка $2t_{imp}$, которая для СШП ВИ меньше периода повторения ($2t_{imp} \ll T$), как правило, на несколько порядков. Это предопределяет практическую невозможность построения ФН (11) пачки СШП ВИ на плоскости (θ, β) «задержка-скорость» с детальным воспроизведением формы локальных компонент $\chi_m(\theta, \beta)$. Для преодоления этой трудности использовалась редукция (перенос) компонент ФН согласно формуле $\chi_m(\theta + m(T - kt_{imp}), \beta)$, где $k \geq 2$. При этом происходит перенос всей совокупности компонент с большого интервала относительных задержек $(-NT, NT)$ на существенно меньший интервал $(-kNt_{imp}, kNt_{imp})$ без изменения ширины и формы отдельных компонент. Редуцированная (сжатая по θ), ФН пачки задается формулой

$$\chi_{red}(\theta, \beta) = \left| \sum_{m=-N}^N \chi_m(\theta + m(T - 2t_{imp}), \beta) \right|. \quad (13)$$

По формуле (13) проводились конкретные расчеты редуцированных ФН пачки СШП ВИ, примеры результатов которых даны в следующем разделе.

3. Примеры количественного расчета функций неопределенности пачек СШП видеоимпульсов

Рассматривались два варианта пачек СШП ВИ: 1) пачка действительных ВИ $s_0(t)$ в виде моноциклов (рис.1а) и 2) пачка полициклических ВИ $\dot{s}_0(t)$ (рис. 1б) с параметрами, как на рис. 1. Период повторения импульсов составлял $T = 10$ мкс, а их количество $N+1$ варьировалось. На рис. 2 показаны центральные сечения ФН во всем интервале расстроек по задержкам и нормированным скоростям β в случае 17-ти импульсной пачки моноциклов. Отображенный на рис. 2б интервал скоростей в абсолютных значениях отвечает неравенству $|v| \leq 15000$ м/с. Разрешающая способность по скорости данной короткой пачки СШП ВИ мала и равна примерно 820 м/с по уровню лепестка -3 дБ. Она улучшается при переходе к полициклическим ВИ и большим N , что иллюстрируется сравнением рис. 3а и 3б, на которых представлены сечения по скорости в случае 65-ти импульсных пачек ВИ двух видов.

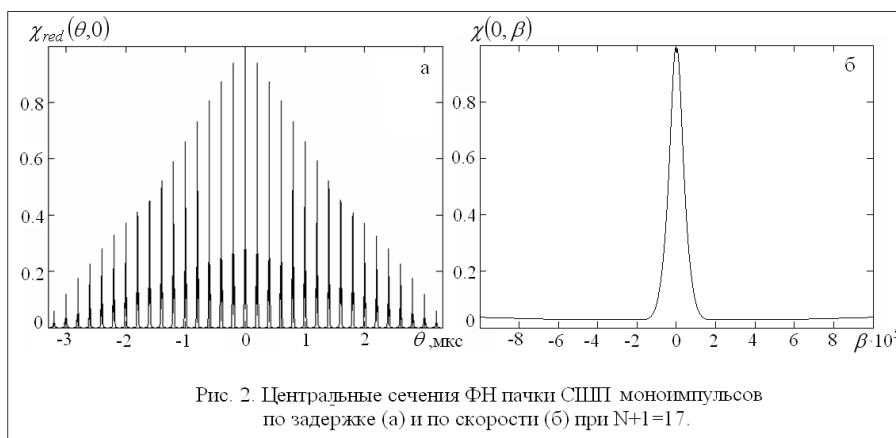
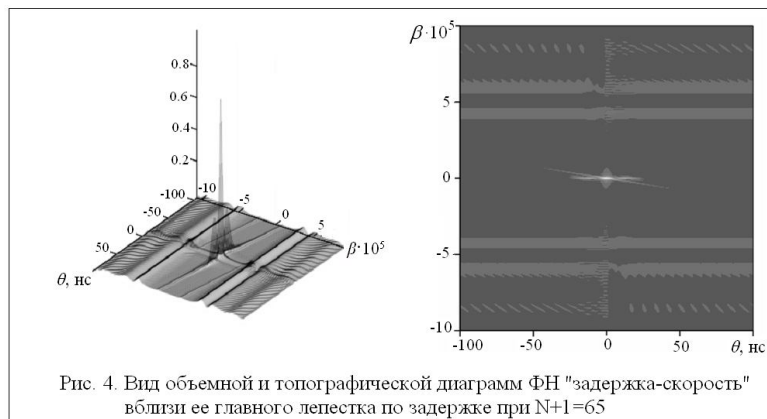
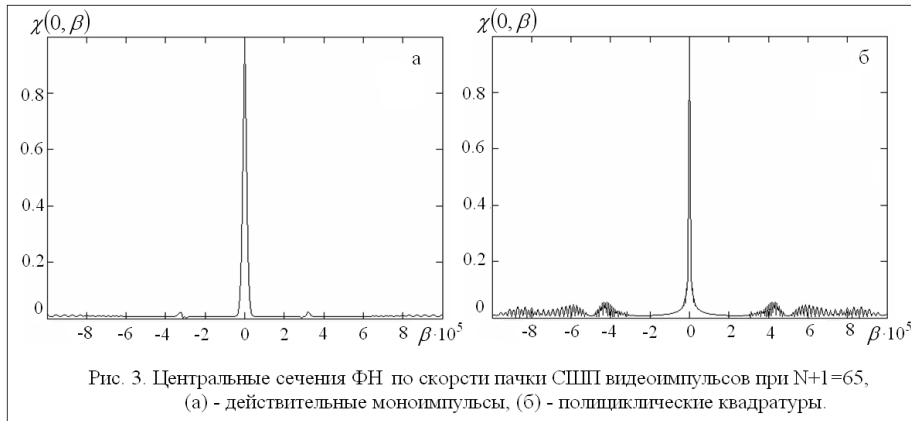


Рис. 2. Центральные сечения ФН пачки СШП моноимпульсов по задержке (а) и по скорости (б) при $N+1=17$.

Объемная и топографическая диаграммы двумерной ФН вблизи ее главного лепестка по задержке для пачки из 65-ти полициклических ВИ при принятых параметрах рис. 1 показаны на рис. 4. Из рис. 3 и 4 видно, что уровень боковых лепестков ФН вне интервала задержек $|\theta| \leq t_{imp}$ и во всем скоростном интервале крайне мал, что характерно для пачек СШП ВИ.



Результирующие данные по разрешающей способности по скорости (в м/с) для СШП пачек при двух рассматривавшихся видах ВИ при $\tau_{imp} = 10$ нс, $T = 100$ мкс, $f_0 = 200$ МГц и различной длительности пачки NT представлены в таблице. В последней строке таблицы для сравнения показаны разрешающие способности по скорости для узкополосного монохроматического импульса с длительностями NT и частотой 200МГц.

NT , мс	1.6	3.2	6.4	12.8
Моноцикл	818	436	234	97
Полицикл	369	214	105	46
Монохром	468	234	117	58

Видно, что в данном случае практически значимые значения разрешающей способности по скорости имеют место при длительностях пачки $NT \geq 12.8$ мс ($N+1 \geq 127$). Наилучшее разрешение имеет пачка полициклических ВИ, выигрывая по отношению к моноциклическим ВИ более, чем в два раза. Узкополосный монохроматический импульс проигрывает пачке полициклических СШП ВИ с той же частотой f_0 примерно на 25 %, что вполне объяснимо влиянием сверхширокополосности.

Представленные теоретические результаты могут использоваться для рационального выбора параметров пачечных СШП ВИС в задачах ближней видеоимпульсной радиолокации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Саблин В.Н., Чапурский В.В. Корреляционные методы обработки сигналов в широкополосных и сверхширокополосных шумовых РЛС. Труды Юбилейной НТК, посвященной 30-летию образования ЦНИИРЭС «Прогрессивные направления развития радиоэлектронных комплексов и систем», 12-14 сентября 2001 г., Москва, АО «ЦНИИРЭС», 2001, часть 1, с. 61-69.
2. Вовшин Б.М. Сверхширокополосная видеоимпульсная система с синтезированной апертурой для параллельного обзора пространства. Радиотехника и электроника, 1999, т. 44, №12, с. 1479-14-86.
3. Справочник по радиолокации. Под ред. М. Скольника, т.1, «Сов. радио», 1976г.