

УДК 534+534.231

## ОБ ОШИБКАХ В ОПРЕДЕЛЕНИИ АМПЛИТУДЫ И ВРЕМЕНИ ПРИХОДА ИМПУЛЬСОВ ПРИ НЕПОЛНОМ ИХ РАЗРЕШЕНИИ

© 2002 г. С. Д. Панкова, Ю. И. Тужилкин

Акустический институт им. Н.Н. Андреева

117036 Москва, ул. Шверника 4

E-mail: bvp@akin.ru

Поступила в редакцию 22.05.01 г.

На примере двух перекрывающихся импульсов, имеющих тональную несущую и гауссовскую огибающую, исследованы ошибки в определении их амплитуд и положений на оси времени в зависимости от степени перекрытия. Показано, что при сильном перекрытии ошибки в определении амплитуд могут превышать 100% (пропадание импульсов); наибольшие смещения максимумов огибающей импульсов имеют порядок их полуширины при половинном перекрытии.

Большинство задач экспериментальной акустики связано с измерением амплитуды и времени распространения сигналов. В простых случаях однопутевого распространения они определяются по максимуму огибающей на выходе фильтра, согласованного с зондирующим сигналом [1]. Тот же подход можно применять и в случаях многопутевого распространения, если разности времен приходов сигнала по различным путям больше обратной ширины его спектра. Трудности возникают в экспериментах с относительно узкополосными сигналами, когда импульсы на выходе приемного фильтра в той или иной мере перекрываются. Отсчет времени их прихода по максимумам огибающей становится неправомерным и требуются более сложные процедуры обработки. Среди них наиболее естественной представляется процедура “выбеливания” спектра принятого сигнала [2]. При этом сигнал становится более широкополосным, а его разрешающая способность возрастает. Платой за это возрастание является падение помехоустойчивости приема и, как следствие, необходимость использования более мощных излучателей. В работе [3] показано, что слежение за вариациями времен распространения сигналов по нескольким путям часто выгодно производить не по огибающей принятых импульсов, а по фазе несущей. При этом задача точного определения моментов прихода в начале слежения остается нерешенной. Более тонкая процедура измерений предложена в работах [4, 5]. Она основана на том, что спектр суммарного сигнала, пришедшего по нескольким путям, модулирован частотами, пропорциональными разностям времен распространения. Эти разности можно определить, вычислив спектр логарифма первоначального спектра (кепстр). Понятно, что при малых разностях времен спектр зондирующего

сигнала должен быть довольно широкополосным, чтобы на нем уложилось достаточное число периодов модуляции.

Более общий подход к решению задачи изложен в [6]. Амплитуды и времена прихода  $N$  перекрывающихся импульсов находятся как наибольший максимум функции правдоподобия в  $2N$ -мерном пространстве возможных амплитуд сигналов и времен их распространения. Однако ввиду громоздкости данная процедура применяется редко. В большинстве экспериментов [7–14] амплитуды и времена прихода импульсов измеряются по их огибающим несмотря на частичное перекрытие. Этому способствует также и возможность повышения отношения сигнала к помехе путем накопления за много циклов измерений в условиях, когда накопление по несущей неэффективно из-за умеренных флуктуаций.

Возникает вопрос о величине ошибок в определении амплитуд и времен прихода сигналов по максимумам огибающей частично перекрывающихся импульсов на выходе приемного фильтра. В данной статье этот вопрос рассмотрен на примере двух импульсов различных амплитуд с различной степенью перекрытия.

Форма первого импульса принята в виде

$$y_1(t) = a_1 \exp \left[ -\frac{\Delta t^2 (n - n_1)^2}{(\Delta t n_0)^2} \right] \cos 2\pi \frac{\Delta t}{T} (n - n_1). \quad (1)$$

Здесь  $T$  – период несущей,  $a_1$  – амплитуда импульса,  $\Delta t$  – шаг по оси времени при оцифровке сигнала,  $n$  – номер текущего отсчета. Максимум импульса расположен при  $n = n_1$ , а его полуширина по уровню  $1/e$  определяется величиной  $\Delta t n_0$ .

Второй импульс  $y_2(t)$  отличается от первого лишь амплитудой  $a_2$  и положением максимума  $n_2$ .

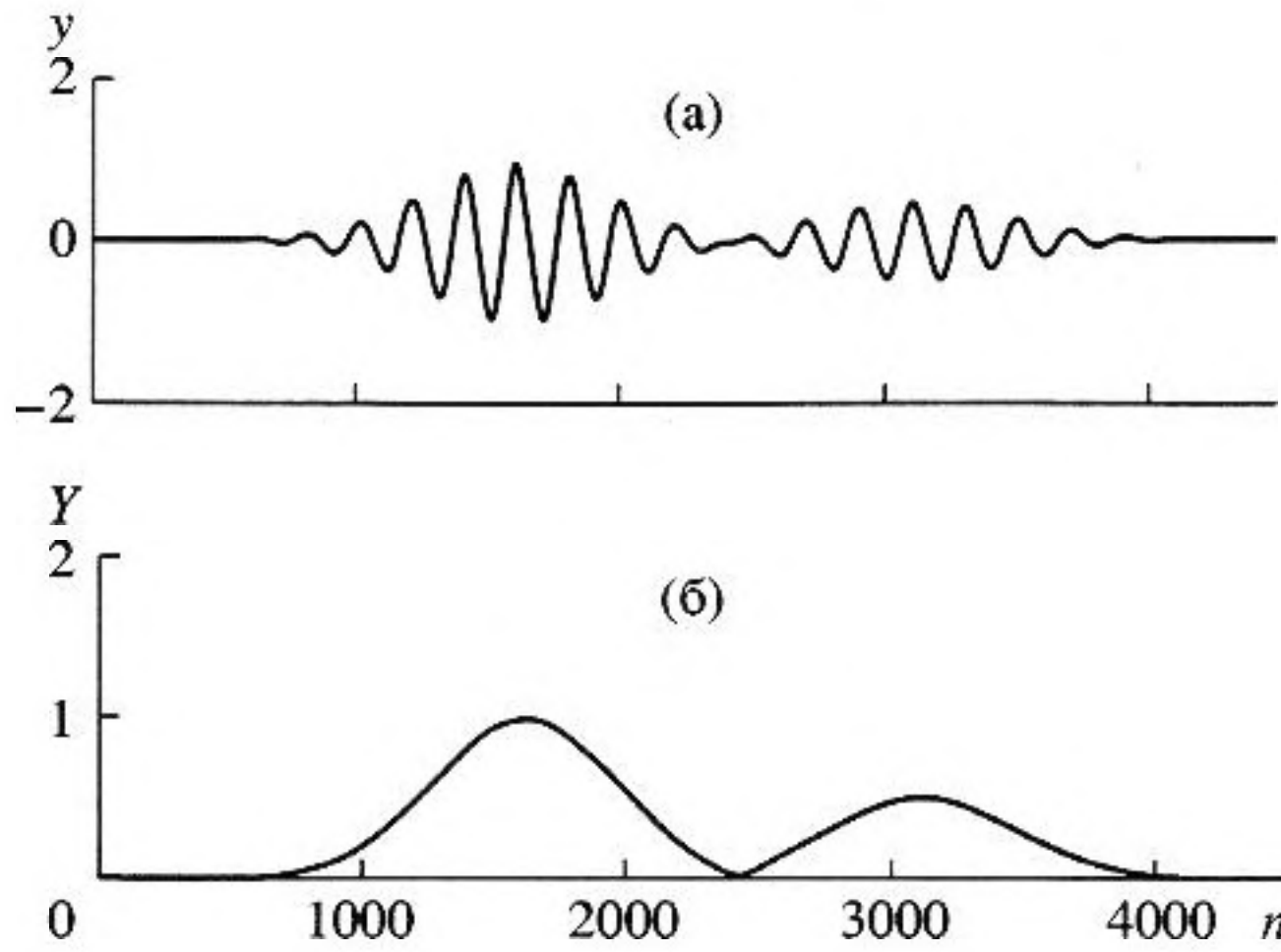


Рис. 1. а – Форма импульсов при малом перекрытии. б – Форма их огибающих.

Огибающая суммы импульсов рассчитывалась по формуле

$$Y(t) = \sqrt{[y_1(t) + y_2(t)]^2 + [\hat{y}_1(t) + \hat{y}_2(t)]^2}. \quad (2)$$

В качестве  $\hat{y}_1(t)$  и  $\hat{y}_2(t)$  приняты сигналы, аналогичные (1), но с заменой косинусов на синусы того же аргумента. Суммарный сигнал для случая разрешенных импульсов  $y(t)$  и его огибающая  $Y(t)$  изображены на рис. 1а,б. При построении графиков принято  $\Delta t/T = 1/200$ , а  $n_0 = 500$ , что соответствует приблизительно пяти периодам несущей на ширине каждого импульса. Подобные импульсы типичны для экспериментов, в которых используются излучатели с умеренной добротностью. Резонансные свойства излучателей обычно определяют спектр зондирующих сигналов. Чтобы перейти на язык частот, напомним, что длительность импульса обратна ширине его спектра  $\Delta f$ . Поэтому длительность нашего импульса, выраженная в числе периодов средней частоты  $f_0$ , может быть записана в виде

$$(1/\Delta f) : (1/f_0) = f_0/\Delta f = Q,$$

где  $Q$  – добротность излучателя. В нашем примере она близка к 5. Понятно, что импульс будет иметь один и тот же вид для различных частот несущей при условии, что полоса его спектра составляет  $1/5$  от  $f_0$ . Вид принятого импульса не меняется также и тогда, когда зондирующий сигнал не является импульсом, но прием осуществляется фильтром, согласованным с этим сигналом, а в среде отсутствует дисперсия.

Для полноты картины ниже мы рассмотрим также и пример в 5 раз более высокочастотного импульса, имеющего ту же форму огибающей. Она во всех случаях выбрана гауссовской, чтобы

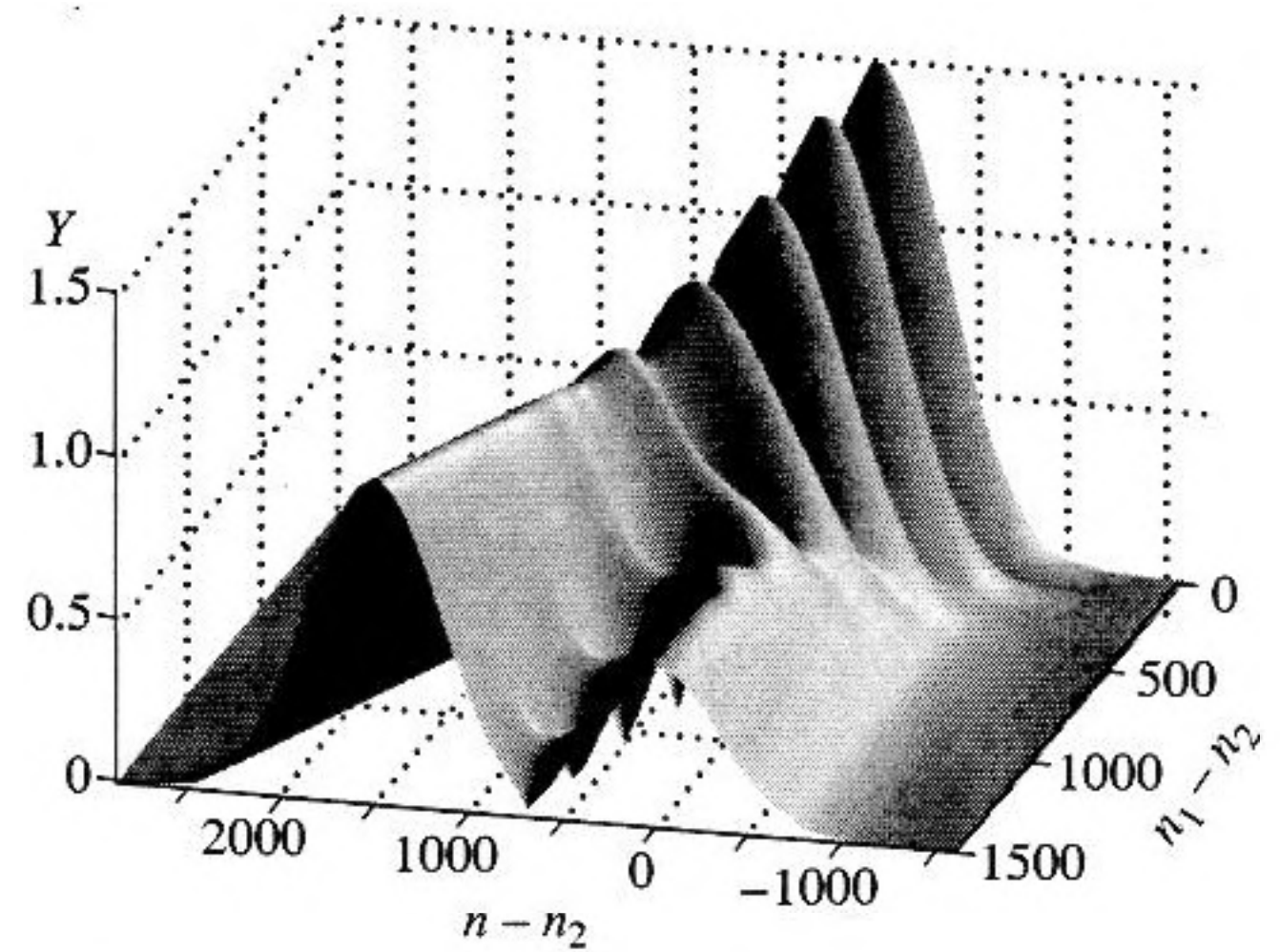


Рис. 2. Огибающая суммы импульсов с амплитудами 1 и 0.5 в зависимости от степени перекрытия.

сигналы на выходе согласованного фильтра не имели боковых лепестков. В экспериментах это обеспечивается использованием зондирующих сигналов с гауссовской формой спектра.

При расчетах положение одного из импульсов фиксировалось, а второй сдвигался с шагом  $10\Delta t$  от полного совпадения до их разрешения. При перекрытии импульсов, изображенных на рис. 1, в перекрывающихся участках возникает интерференция между их несущими. При синфазном сложении ширина импульсов возрастает. При полном совпадении времен прихода импульс описывается формулой (2) с суммарной амплитудой. Если сложение противофазно, в перекрывающемся участке возникает минимум, а максимумы огибающей раздвигаются. Объемная картина явления изображена на рис. 2. Она рассчитана для двух импульсов с амплитудами 1 и 0.5. Огибающая их суммы отложена по оси аппликат. По оси абсцисс представлено текущее время в числе отсчетов (от  $n = n_2$ ), а по оси ординат – разность  $n_1 - n_2$  между положениями максимумов обоих импульсов в отсутствии интерференции. Эта разность равна нулю в дальней части рисунка. Здесь огибающая суммарного импульса с амплитудой 1.5 подобна огибающей одиночного. По мере движения к передней части рисунка наибольший импульс отодвигается налево до почти полного разрешения. Суммарный импульс вначале расширяется, а затем из него выделяется малый максимум. Важно отметить, что его выделение начинается при появлении ложбин между наибольшими максимумами. Провалы между максимумами вдоль оси абсцисс видны лишь в передней части рисунка в форме воронок с острями, направленными вниз.

Рассмотрим взаимное влияние импульсов друг на друга в зависимости от расстояния между ними

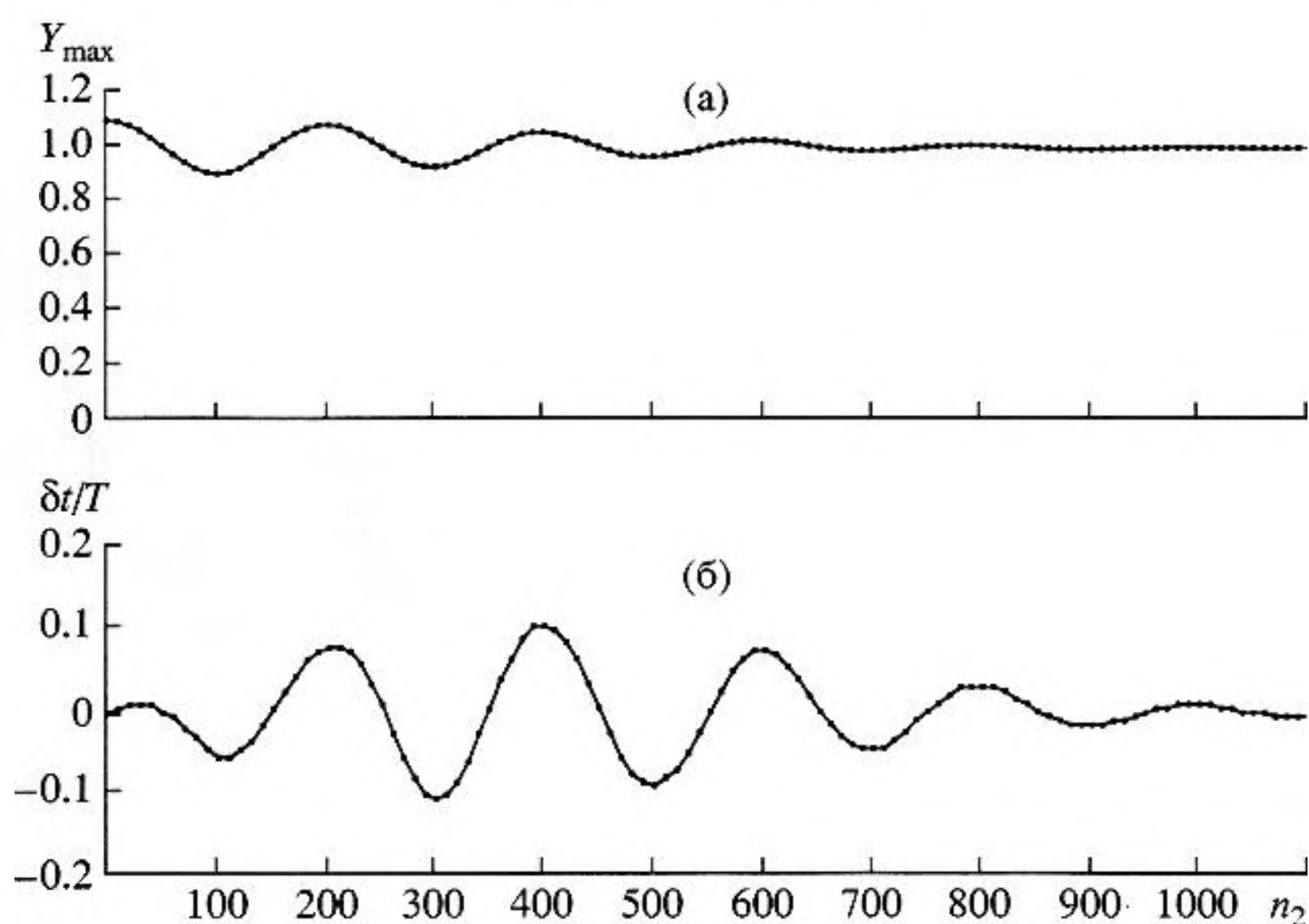


Рис. 3. а – Величина амплитуды и б – положение максимума огибающей основного импульса. Амплитуда мешающего импульса 0.1 от основного.

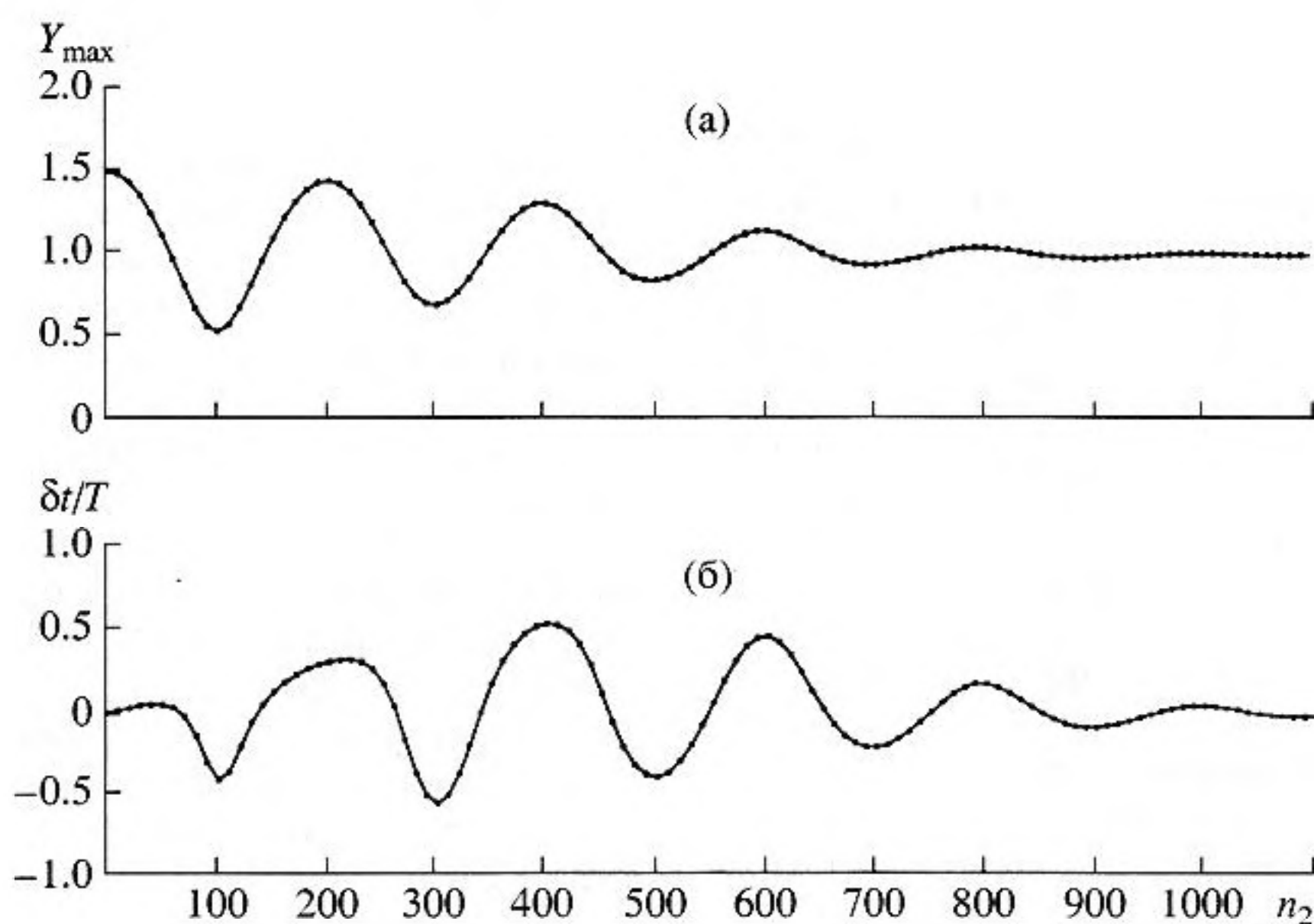


Рис. 4. То же при соотношении амплитуд 1 : 0.5.

$n_2 - n_1$  и соотношения амплитуд  $a_1/a_2$ . Результаты расчетов величины и положения максимума огибающей импульса, выбранного для анализа, представлены на рис. 3–5. Амплитуда исследуемого импульса принята равной 1, а амплитуды второго, являющегося мешающим, – соответственно 0.1; 0.5 и 0.95. Истинное положение исследуемого импульса  $n_1 = 1$ ; положение мешающего изменяется от  $n_2 = 1$  до  $n_2 = 1100$ , что соответствует полному разрешению. Графики представляют амплитуду (а) и смещение (б) максимума огибающей исследуемого импульса относительно истинного поло-

жения, выраженное в числе периодов несущей  $\delta t/T$ . Как можно заметить, амплитуда колеблется от 1.5 при  $n_2 = n_1$  до равной 1 при полном разрешении импульсов. При этом форма ее колебаний при малой амплитуде второго импульса симметрична. Симметрия, однако, нарушается, если амплитуды обоих импульсов почти одинаковы.

Со смещением максимума огибающей дело обстоит сложнее. Когда мешающий импульс на порядок меньше основного, наибольшее смещение основного импульса (0.1 периода несущей) на-

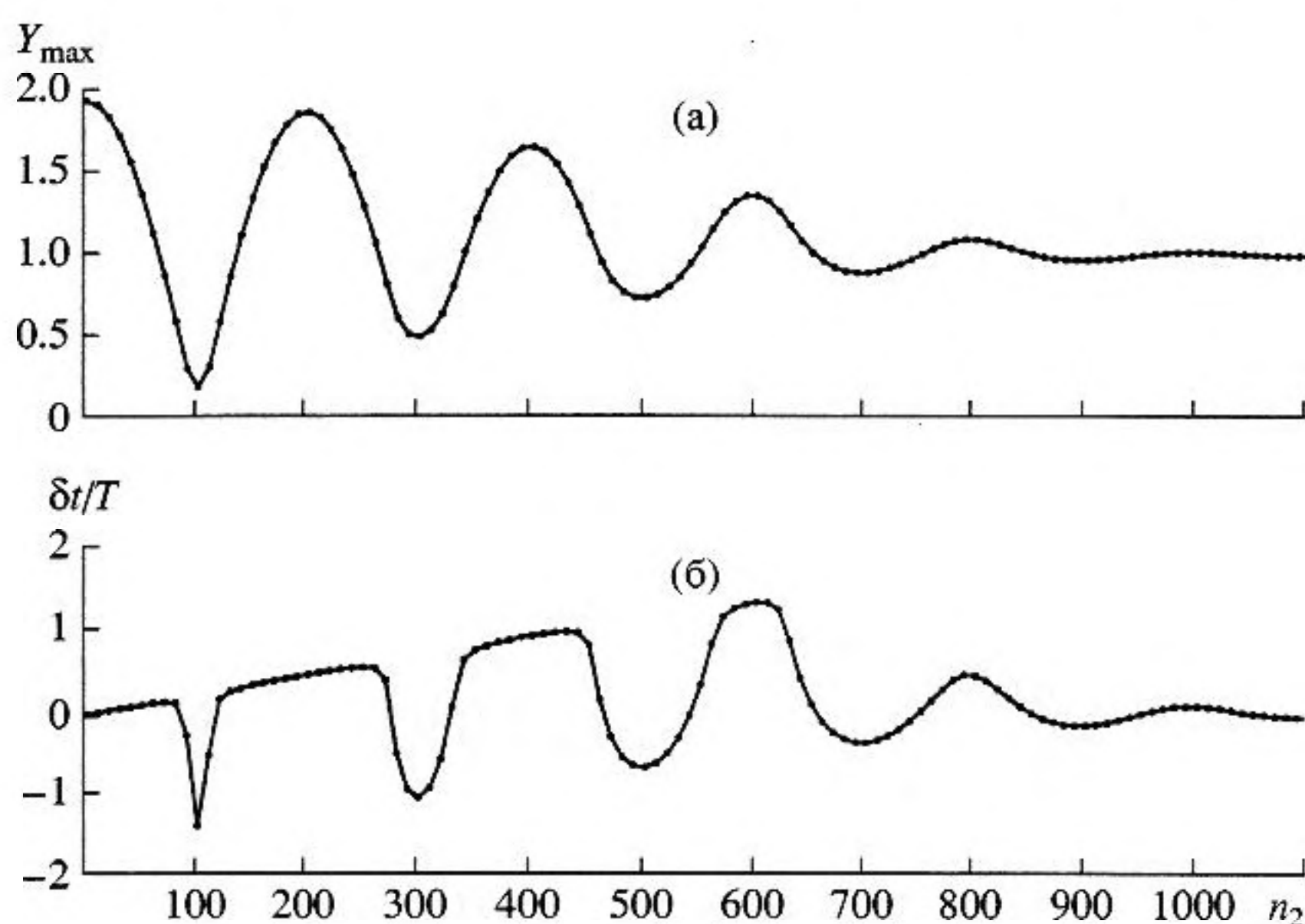


Рис. 5. То же при соотношении амплитуд 1 : 0.95.

блюдается при приблизительно половинном перекрытии импульсов. Здесь колебания смещения синфазны с колебаниями амплитуды. В случае небольших сдвигов влияние малого мешающего импульса невелико в силу существенной разницы амплитуд импульсов. Оно возрастает на склоне основного импульса, чтобы снова упасть при почти полном разрешении. При синфазной интерференции несущих максимумы импульсов сближаются, при противофазной – расходятся.

Когда амплитуды импульсов близки друг к другу, форма колебаний смещения максимума существенно усложняется (рис. 5б). По мере отодвигания мешающего импульса смещение основного возрастает приблизительно линейно. Возрастающие периодически сменяются резкими провалами, ширина которых увеличивается по мере расхождения импульсов. Максимальное смещение, близкое к 1.5 периодам несущей, наблюдается при  $n_2 = 600$ . Представив себе оба импульса на оси времени, легко понять, что в соответствии с (1) и (2) огибающая невозмущенного импульса здесь равна 0.24, а раздвинутые импульсы перекрываются на уровне 0.7.

Возрастание ошибок для более высокочастотных импульсов представлено на рис. 6. В сравнении с рис. 5 импульсы отличаются только в 5 раз более высокой частотой несущей при той же огибающей. Как легко заметить, наибольшее смещение максимума в сторону мешающего импульса наблюдается при том же  $n_2 = 600$  и составляет 7.5 периодов в 5 раз более высокой частоты. Узкие (а затем расширяющиеся) участки смещений той же величины, но в противоположную сторо-

ну, возникают при противофазной интерференции импульсов.

В некоторых задачах требуется измерить положение импульса, амплитуда которого не является максимальной. Тогда более крупные импульсы выступают в роли мешающих. Чтобы оценить их влияние, мы выполнили расчеты для импульсов с амплитудами 0.5 и 1 и низкочастотной несущей. Результаты изображены на рис. 7. В отличие от рис. 4 здесь неподвижным является малый импульс. На рис. 7а представлены амплитуды обоих импульсов – малого (крестики) и большого (точки), на рис. 7б – положения максимумов их огибающих. Как видно, при значительном перекрытии мешающее воздействие большого импульса на малый очень велико – малый импульс просто не существует. Он начинает появляться в коротких промежутках с сильно искаженными значениями амплитуды (0.125 вместо 0.5) и положения на оси времени (2 периода несущей вместо нуля). Видно также обратное влияние малого импульса на большой. Его амплитуда и положение максимума огибающей колеблются около истинных значений. В сравнении с малым импульсом размах колебаний приблизительно вдвое меньше. На участках, где малый импульс существует, колебания значений амплитуд синфазны, а временных смещений – противофазны.

Подведем итоги. Определение амплитуд и времен прихода сигналов по величине и положению максимумов огибающих импульсов на выходе приемного фильтра, согласованного с излученным сигналом произвольного вида, приводит к ошибкам, если импульсы перекрываются. Неточ-

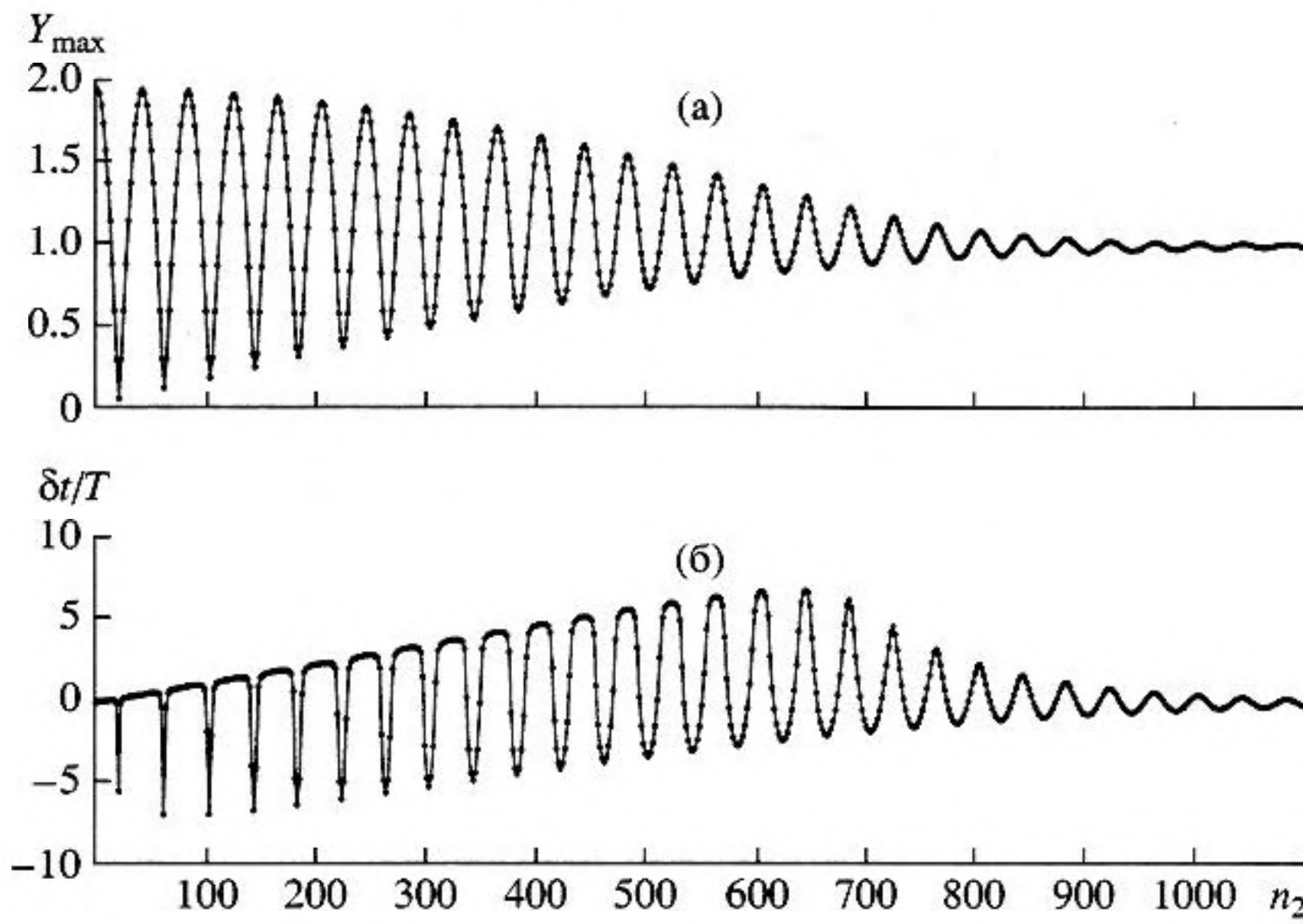


Рис. 6. То же в случае узкополосных импульсов. Соотношение амплитуд 1 : 0.95.

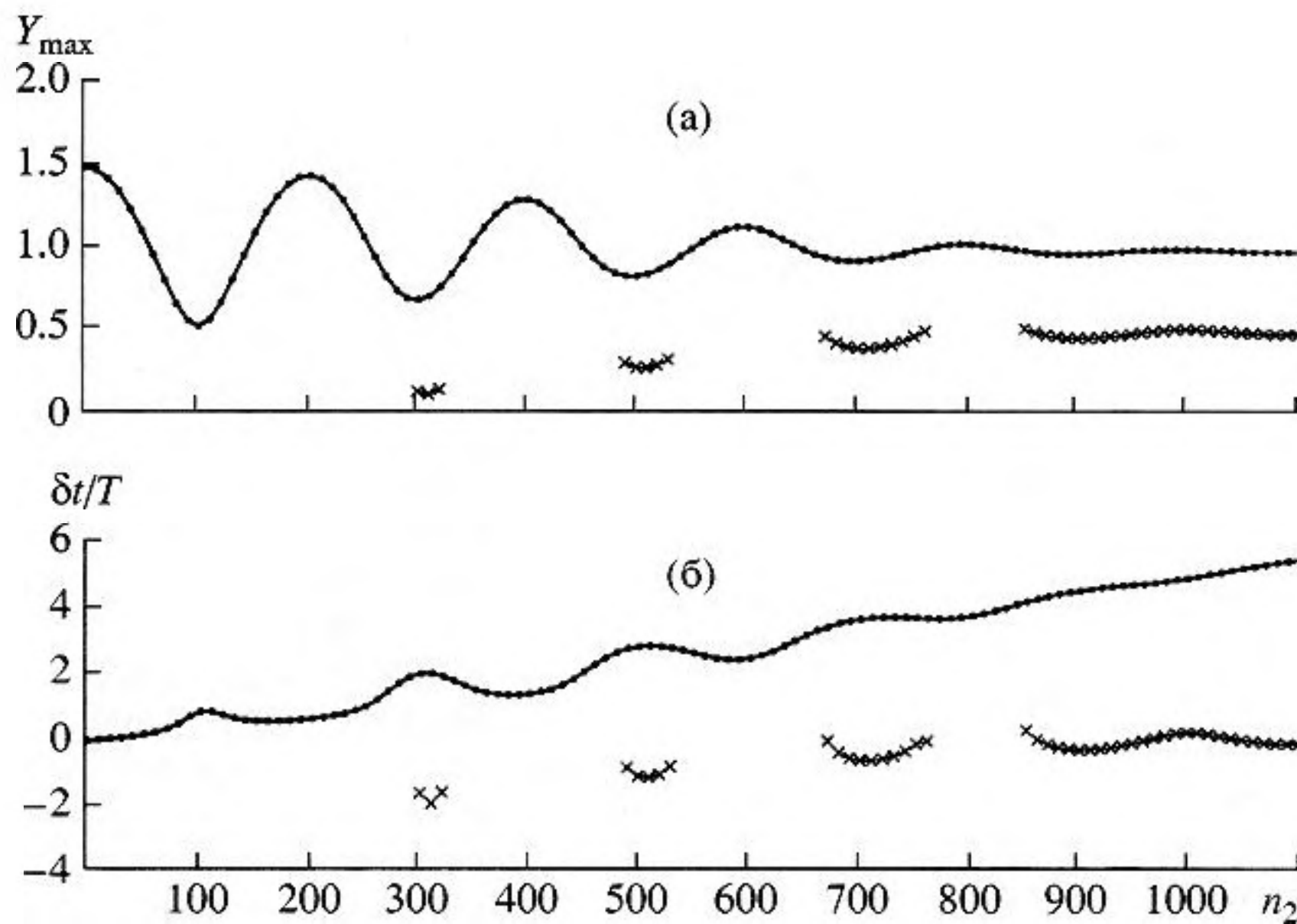


Рис. 7. а – Значения амплитуд; б – Положение максимумов огибающей при соотношении амплитуд основного и мешающего импульсов 0.5 : 1.

ности в оценках амплитуды максимальны при почти полном перекрытии импульсов, а если оценивается время прихода – при перекрытии на уровне половины ширины их огибающей. Ошибка невелика в случаях, когда мешающий импульс мал. Наоборот, если он близок к оцениваемому, ошибки по амплитуде при сильном перекрытии импульсов приближаются к 100% и уменьшаются по мере раздвижения импульсов. В противоположность этому ошибки в определении времени прихода возрастают по мере раздвижения, достигая полуширины импульса при половинном пере-

крытии. При сильном перекрытии наблюдаются узкие отрицательные выбросы величин ошибок, обусловленные противофазной интерференцией импульсов. При половинном перекрытии наиболее вероятны ошибки типа завышения времени распространения сигналов. Если мешающий импульс больше импульса, подлежащего оценке, последний существует только при противофазной интерференции перекрывающихся импульсов. Ошибки в определении времени прихода малого импульса при этом возрастают.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Хелстром К. Статистическая теория обнаружения сигналов. М.: Изд-во иностр. лит., 1963.
2. Birdsall T.G., Metzger K.Jr. Factor inverse matched filtering // J. Acoust. Soc. Amer. 1986. V. 79 (1). P. 91–99.
3. Дьяченко В.Р., Тужилкин Ю.И. Изменчивость времен распространения сигналов по отдельным лучам в мелком море. // Акуст. журн. 1996. Т. 42. № 2. С. 202–207.
4. Зверев В.А., Павленко А.А., Соколов А.Д., Шаронов Г.А. “Слепая” дереверберация в глубоком море. // Акуст. журн. 2001. Т. 47. № 1. С. 76–82.
5. Зверев В.А., Стромков А.А. О возможностях кепстрального анализа в уточнении взаимных задержек и амплитуд сигналов. // Акуст. журн. 2001. Т. 47. № 5. С. 657–663.
6. Ehrenberg J.E., Ewart T.E., Morris R.D. Signal-processing techniques for resolving individual pulses in multipath signal // J. Acoust. Soc. Amer. 1978. V. 63. P. 1861–1865.
7. Козельский А.Р., Мазанников А.А., Мигулин А.А., Петников В.Г., Шмелев А.Ю. Об измерении времени распространения импульсных сигналов в мелком море // Акуст. журн. 1993. Т. 39. № 5. С. 854–858.
8. Кулаков А.В., Попов Р.Ю. Определение интервалов временной стабильности параметров гидроакустического канала // Акуст. журн. 2000. Т. 46. № 5. С. 671–679.
9. Worcester P.F., Cornuelle B.D., Kuldebrant J.A., Hodkiss W.S. Jr, Duda T.F., Boid J., Howe B.M., Mercer J.A., Spindel R.C. A comparison of measured and predicted broadband acoustic arrival patterns in travel time-depth coordinates an 1000-km range // J. Acoust. Soc. Amer. 1994. V. 95 № 6. P. 3118–3128.
10. Mikhalevsky P.N., Gavrilov A.N., Baggeroer A.B. The transarctic acoustic propagation experiment and climate-monitoring in the Arctic // IEEE J. Ocean. Eng. 1999. V. 24. № 2. P. 183–202.
11. Norris D.E., Spiesberger J.L., Merdes D.W. Comparison of basin-scale acoustic transmission with rays and further evidence for a structured thermal field in the north-east Pacific // J. Acoust. Soc. Amer. 1998. V. 103. № 1. P. 182–194.
12. Simmen J.A., Flatte S.M., DeFerrari H.A., Nguyen H., Williams N.J. Near-caustic behavior in a 270-km acoustical experiment // J. Acoust. Soc. Amer. 1999. V 105. № 6. P. 3231–3244.
13. Worcester P.F., Cornuelle B.D., Dzieciuch M.A., Munk W.H., Howe B.M., Mercer J.A., Spindel R.C., Colosi J.A., Baggeroer A.B. A test of basin-scale acoustic thermometry using a large-aperture vertical array at 3250-km range in the eastern North Pacific Ocean // J. Acoust. Soc. Amer. 1999. V. 105. № 6. P. 3185–3201.
14. Colosi J.A., Scheer E.K., Flatte S.M., Cornuelle B.D., Dzieciuch M.A., Munk W.H., Worcester P.F., Howe B.M., Mercer J.A., Spindel R.C., Metzger K., Birdsall T.G., Baggeroer A.B. Comparisons of measured and predicted acoustic fluctuations for a 3250-km propagation experiment in the eastern North Pacific Ocean // J. Acoust. Soc. Amer. 1999. V. 105(6). P. 3202–3218.

## Errors in the Determination of the Amplitude and Arrival Times of Acoustic Pulses under Their Incomplete Resolution

S. D. Pankova and Yu. I. Tuzhilkin

Andreev Acoustics Institute, Russian Academy of Sciences, ul. Shvernika 4, Moscow, 117036, Russia  
e-mail: bvp@akin.ru

**Abstract**—By the example of two overlapping pulses with a sinusoidal carrier and a gaussian envelope, errors in the determination of their amplitudes and positions on the time axis as functions of the extent of their overlapping are investigated. It is shown that, in the case of a considerable overlapping, the errors in the amplitude determination can exceed 100 % (the pulses disappear); the greatest shifts of the maxima of the pulse envelopes are of the order of their half-width in the case of a half-pulse overlapping.