

## ЛИТЕРАТУРА

1. Луитт Р. М. Алгоритмы реконструкции с использованием интегральных преобразований // ТИИЭР.— 1983.— Т. 71, № 3.
2. Сивухин Д. В. Оптика.— М.: Наука, 1985.
3. Троицкий И. Н., Уманский М. С. Анализ алгоритма аппроксимации томографических проекций полиномами в условиях флуктуирующего информационного сигнала // Автометрия.— 1987.— № 6.

Поступила в редакцию 1 июня 1987 г.

УДК 621.396.962 : 517.217

Ю. Н. ГОРБУНОВ

(Челябинск)

### ЦИФРОВЫЕ МЕТОДЫ ДАЛЬНОМЕТРИИ В ИМПУЛЬСНЫХ ОБЗОРНЫХ РЛС

**Введение и постановка задачи.** В измерителях дальности импульсных обзорных радиолокационных станций (РЛС) при малых отношениях сигнал/шум невозможно получить точные мгновенные отсчеты задержки эхосигналов отдельных зондирований, поэтому процесс измерения (оценивания) организуется не по одному, а по серии (пачке)  $n$  импульсов. В настоящее время для конкретных дальномерных систем определены оптимальные алгоритмы обработки, обеспечивающие предельно достижимую (потенциальную) точность измерений, однако желательно получить количественные характеристики точности в условиях «грубых» (малоразрядных) цифровых отсчетов задержки эхосигналов и ответить на вопрос: является ли наращивание разрядности текущих отсчетов единственным средством повышения точности измерения или точность измерения можно повысить за счет совместной алгоритмической обработки совокупности  $n$  отсчетов.

С целью анализа процедур уменьшения ошибок дискретности в статье предполагается, что для уточнения, связанного с истинной дальностью среднего положения  $\tau_{ЦТ} \in [0, \tau_0]$  центра тяжести (ЦТ) эхосигнала в анализируемом  $j$ -м элементе разрешения (ЭР)  $\tau_0$  (рис. 1), используется один двоичный разряд:

$$\mu_i = \begin{cases} 1, & \text{если } t_i \leq \tau_i; \\ 0, & \text{если } t_i > \tau_i, \end{cases}$$

где  $\tau_i$  — временной интервал, определяющий положение ЦТ сигнала на  $i$ -м зондировании ( $W(\tau_i) - 3R\tau_i$ );  $t_i$  — положение (фаза)  $i$ -го квантуемого импульса, используемого для интерполяции.

Если интерполяция положения ЦТ эхосигнала внутри ЭР  $\tau_0$  не производится, т. е. оценка дальности формируется на основе обычного подсчета интервалов  $\tau_0$ , то величина  $\tau_{ЦТ}$ , по существу, представляет собой среднюю ошибку дискретности измерения. По ансамблю возможных значений  $\tau_{ЦТ}$  среднеквадратическая ошибка (СКО) дискретности измерений  $\sigma_0$  для этого случая равна  $\tau_0/2\sqrt{3}$ . При малых перемещениях цели за время наблюдения, а также при достаточно больших отношениях сигнал/шум изменением  $\tau_{ЦТ}$  и  $\tau_i$  можно пренебречь, поэтому обычное усреднение «грубых» отсчетов с большим элементом (квантом)  $\tau_0$  по серии  $n$  импульсов не приводит к повышению точности измерения, так как ошибки измерений отдельных отсчетов практически имеют одинаковую величину и знак.

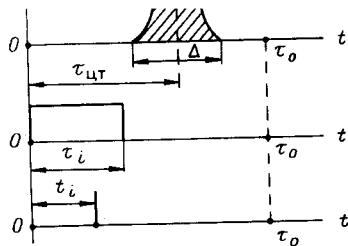


Рис. 1

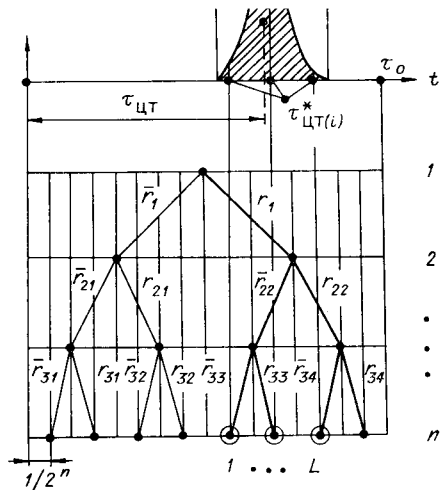


Рис. 2

Искусственно создать условия, при которых ошибки измерений текущих отсчетов будут иметь разные знаки и при усреднении взаимно компенсировать друг друга, позволяют рандомизированные процедуры, использующие в отличие от обычных (детерминированных) процедур случайный эксперимент (случайное смещение шкалы квантования, введение дополнительной случайной задержки принимаемого эхосигнала, применение стохастической интерполяции с помощью вспомогательных квантовых импульсов и другие способы). В статье применяется третий из перечисленных способов.

Измерение дальности упомянутыми выше способами составляет предмет известного в вычислительной математике метода Монте-Карло.

Вопросы использования метода Монте-Карло (метода статистических испытаний) для дальнометрии рассматривались в [1—4], однако при этом возникает проблема выбора способа измерения при наличии дисперсии (Д) положения ЦТ эхосигнала внутри ЭР  $\tau_0$ . Также представляет теоретический интерес определение места предлагаемых способов цифрового измерения дальности в кругу известных.

**Рандомизация — способ сглаживания ошибок дискретности.** Измерение (оценивание) методом Монте-Карло параметра  $\tau_{цт}$  сводится к измерению математического ожидания (МО)  $M_1\{\mu_i\}$  некоторой вспомогательной случайной величины (СВ)  $\mu_i$ , принимающей при размахе флуктуаций положение ЦТ:  $\Delta \leq \tau_0$ . В зависимости от исхода испытаний на совпадение временных интервалов  $\tau_i$  с квантуемыми импульсами  $t_i \in [0, \tau_0]$  в текущем  $j$ -м и в соседних  $(j-1)$ -м и  $(j+1)$ -м ЭР значения  $-1, 0, 1, 2$ . Положение квантуемых импульсов внутри каждого ЭР искусственно задается случайным.

Нетрудно показать, что при равномерных ЭР  $t_i$  и  $\tau_i$  МО  $M_1\{\mu_i\}$  связано с  $\tau_{цт}$  линейной зависимостью  $M_1\{\mu_i\} = \tau_{цт}/\tau_0$ . При других распределениях получаются иные зависимости между  $M_1\{\mu_i\}$  и  $\tau_{цт}$ , однако в любом случае выборочное оценивание МО  $M_1\{\mu_i\}$  по результатам  $n$  изме-

рений позволяет сформировать «состоятельную» оценку  $\tau_{цт}^* = \frac{\tau_0}{n} \sum_{i=1}^n \mu_i$

параметра  $\tau_{цт}$ . В этом основная идея рандомизации в задаче снижения влияния ошибок дискретности в цифровых измерениях. Главный вопрос заключается в том, как быстро СКО измерений  $\sigma_0$  уменьшается в зависимости от  $n$ .

При независимых измерениях СКО  $\sigma_0$  уменьшается сравнительно медленно с ростом  $n$  и имеет порядок  $n^{-1/2}$ . Исходная дисперсия  $D_{\sigma_0}$  ошибок измерения определяется дисперсией  $D$  флуктуаций положения ЦТ эхосигнала и дисперсией шума квантования  $D_0 = \tau_0^2 p q_s$ , где  $p = \tau_{цт}/\tau_0$ ,

$q = 1 - p$  [2]. При больших отношениях сигнал/шум флуктуации положения ЦТ эхосигнала практически отсутствуют, поэтому СВ  $\mu_i$  становится бинарной, принимая значения  $\mu_i = 1$  с вероятностью  $p$  и  $\mu_i = 0$  с вероятностью  $q$ , а СКО измерений

$$\sigma_0 = D_{\Sigma_0}^{1/2} n^{-1/2} \cong D_0^{1/2} n^{-1/2} = \tau_0 (pq)^{1/2} n^{-1/2}. \quad (1)$$

**Использование коррелированных выборок.** Если элементы  $\mu_i$  вектор-выборки  $\mu_n = [\mu_i]$ ,  $i = 1, 2, \dots, n$ , результатов измерений зависимы (в отличие от варианта чисто случайного закона модуляции  $t_i$ ), то выражение (1) для СКО надо заменить на

$$\sigma_0 = (M_1 \{(\tau_{\text{ЦТ}}^* - \tau_{\text{ЦТ}})^2\})^{1/2} = \tau_0 \left( \frac{pq}{n} + \frac{2}{n^2} \sum_{i < k}^n \sum_{k}^n \text{cov} \{ \mu_i \mu_k \} \right)^{1/2}. \quad (2)$$

Разумно введенная отрицательная корреляция между элементами  $\mu_i$  вектор-выборки  $\mu_n$  может приводить к отрицательным членам с ковариациями в формуле (2) и уменьшить СКО по сравнению со СКО обычной случайной выборки.

Возможности уменьшения СКО измерений за счет отрицательной корреляции рассматривались в [1, 4], причем в [4] цифровые отсчеты были связаны зависимой цепью Маркова, а в [1] — жесткой стохастической зависимостью, когда фаза  $t_1$  первого цифрового отсчета являлась независимой СВ с равномерным ЗР, а все последующие значения фазы образовывали детерминированную траекторию  $t_2, t_3, \dots, t_n$  по способу Лемера:

$$t_i = \tau_0 R \left\{ \frac{t_1 + (i-1) \Delta t}{\tau_0} \right\},$$

где  $R\{x\}$  — функция дробной доли  $x$ ;  $\Delta t$  — величина набега фазы за одно зондирование.

В [1] отмечалось, что модуляция фазы  $t_i$  по способу Лемера технически реализуется при биении частот измеряемой и квантующей последовательностей импульсов либо при переключении отводов регистра Мебиуса (или линии задержки).

В [1, 4] установлено, что при определенных предположениях о законе модуляции фазы  $t_i$  СКО измерений может уменьшаться в зависимости от  $n$  значительно быстрее (от  $n^{-1/2}$  до  $n^{-1}$ ).

Такие же пределы скорости сходимости обеспечивают многоэтапные рекурсивные процедуры измерений [2, 3], в которых замеры на каждом отдельном этапе независимы в отличие от измерений на соседних этапах.

Анализ возможностей использования коррелированных выборок показывает, что верхний предел скорости сходимости  $n^{-1}$  достигается при больших отношениях сигнал/шум ( $D \rightarrow 0$ ), а нижний  $n^{-1/2}$  — при произвольных.

**Поисковые процедуры оценивания.** Для поисковых процедур измерения характерно формирование рекуррентных оценок. Для оценки типа выборочного среднего рекуррентная форма имеет следующий вид:

$$\tau_{\text{ЦТ}(i)}^* = \frac{1}{i} \sum_{l=1}^i \mu_l = \frac{i-1}{i} \tau_{\text{ЦТ}(i-1)}^* + \frac{\mu_i}{i}. \quad (3)$$

Несмотря на рекуррентную форму, отсутствие связи между законом модуляции фазы  $t_i$  и результатами измерения ограничивает возможности линейной оценки (3) верхним пределом Рао — Крамера [2].

Дальнейшая оптимизация процедуры измерения в предположении нелинейной рекуррентной обработки «грубых» отсчетов приводит к модифицированным процедурам Больцано вида

$$\tau_{\text{ЦТ}(i)}^* = \tau_{\text{ЦТ}(i-1)}^* + \gamma_i \text{sign } \mu_i, \quad (4)$$

где  $\gamma_i$  — переменный шаг коррекции оценки ( $\tau_0 2^{-i} < \gamma_i \leq \tau_0 i^{-1}$ );  $\text{sign } \mu_i$  — знак отсчета  $\mu_i$ .

Положение  $t_i$  квантующих импульсов в таких процедурах задается значением оценки  $\tau_{ЦТ(i-1)}^*$  на  $(i-1)$ -м шаге измерения. В этом смысле алгоритм (4) является поисковым. Достижение главной цели поиска — отыскание нуля линейной функции отклонений  $f(\tau_{ЦТ}^*) = \tau_{ЦТ}^* - \tau_{ЦТ}$  в условиях, когда точные отсчеты целевой функции получить невозможно, а «грубые» отсчеты  $\mu_i$  позволяют определить лишь необходимое направление движения к корню уравнения  $f(\tau_{ЦТ}^*) = 0$  (вправо при  $\text{sign } \mu_i > 0$  и влево при  $\text{sign } \mu_i < 0$ ).

В отличие от метода стохастической аппроксимации величина шага  $\gamma_i$  в модифицированных процедурах Больцано может уменьшаться в зависимости от номера  $i$  быстрее гармонического ряда  $i^{-1}$  и медленнее показательного —  $2^{-i}$ . Анализ сходимости оценок (4) показывает, что поисковые рекуррентные процедуры оценивания обеспечивают скорость сходимости порядка  $n^{-1/2}$ , а при больших отношениях сигнал/шум порядка  $n^{-1}$  и более. В предельном случае скорость сходимости равна  $2^{-n}$ , при этом модифицированная процедура Больцано вырождается в обычную процедуру «деления отрезка пополам», для которой  $\gamma_i = 2^{-i} \tau_0$ ,  $t_1 = \tau_0/2$ .

На рис. 2 изображены траектории  $\tau_{ЦТ(i)}^* = 1, 2, \dots, n$  для  $n = 3$ .

В общем случае закон распределения  $\tau_{ЦТ(i)}^*$  является дискретным и определен в точках  $1, 2, \dots, L$ . Вероятности каждого состояния задаются произведением вероятностей  $r_{ij}$  разветвления процесса по отдельным ветвям графа рис. 2. Здесь следует отметить, что для практического обеспечения предельной скорости сходимости необходима априорная информация об отношении сигнал/шум. При отсутствии такой информации, наряду с формированием текущей оценки дальности, нужно формировать оценку амплитуды принимаемого эхосигнала.

Сравнивая обсуждаемые рекуррентно-поисковые процедуры измерения с известными методами поиска экстремума функции одной переменной: метод Кифера — Фибоначчи, поиск парами (дихотомия), «золотого сечения», поиск по дискретам [5], можно сказать, что специфика измерения рассмотренным методом позволяет получить существенный выигрыш в точности измерения при  $n \gg 1$  и  $\Delta = 0$  и конкурировать с известными методами при  $n < 10$  и  $\Delta < 0,1\tau_0$ .

На рис. 3 показаны осциллограммы полезных эхосигналов в смеси с шумом и соответствующие им зоны флуктуаций положения ЦТ для малых ( $a, б$ ), средних ( $в, г$ ) и больших ( $д, е$ ) отношений сигнал/шум.

**Частные случаи.** При обработке сигналов в импульсных РЛС интервал временного квантования  $\tau_0$ , разбивающий дальность на каналы размером  $d = 0,5C\tau_0$  ( $C = 3 \cdot 10^8$  м/с — скорость распространения радиоволн), согласуется по Котельникову с длительностью  $\tau_n$  обрабатываемого импульса. При таком квантовании максимальный «размах»  $\Delta$  флуктуаций координатной отметки положения ЦТ не превышает величины кванта  $\tau_0$ . Уточнение положения ЦТ  $\tau_{ЦТ}$  начинается от величины  $\tau_0$ , когда полученная энергия эхосигнала распределяется между двумя смежными дистанционными каналами в соответствующей пропорции. При несогласованном квантовании, когда  $\tau_0 < \tau_n$ , возникают проблемы, связанные с дроблением пакета и необходимостью его «сшивания» по совокупности нескольких дистанционных каналов, в которых распределена энергия всей пачки [6].

Для уточнения положения ЦТ можно использовать метод «прямого счета» [7], предполагающий квантование интервала  $\tau_{ЦТ}$  с более высокой частотой заполнения квантующих импульсов, однако в условиях решения задач усреднения, «сшивания» и интерполяции это приводит к многократным цифровым отсчетам в обработке.

При измерении дальности по способу Лемера, когда  $t_1 = 0$  (рандомизация отсутствует), а  $\Delta t = \tau_0/n$ , имеем еще один метод цифрового измерения — «метод задержанных совпадений» [7].

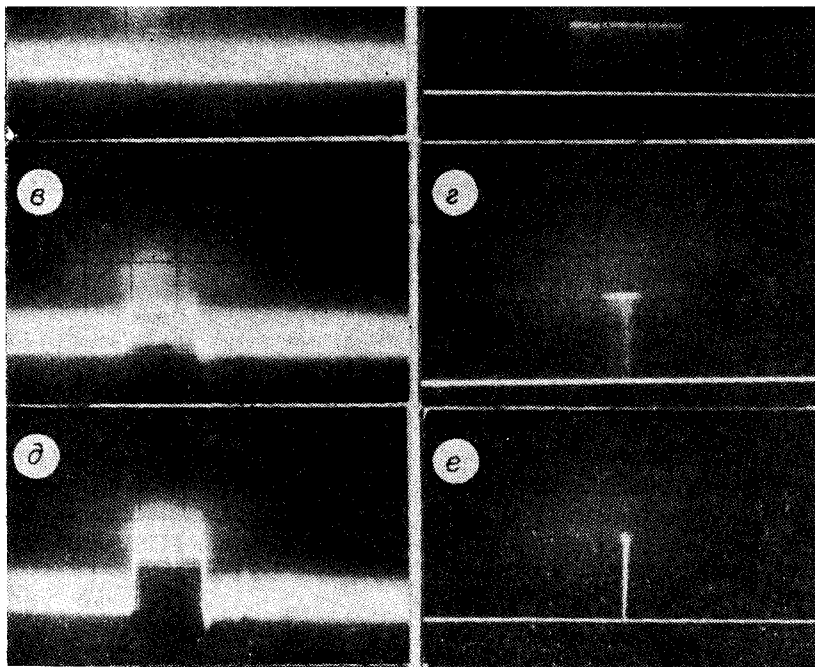


Рис. 3

Рекуррентно-поисковая обработка отсчетов  $\mu_i$  по пачке из  $n$  импульсов с помощью модифицированного алгоритма Больцано, когда  $\gamma_i = 2^{-i}\tau_0$ ,  $t_1 = \tau_0/2$ ,  $\Delta = 0$ , порождает известный метод цифрового измерения временных интервалов — «метод поразрядного кодирования», широко используемый также в задачах аналого-цифрового преобразования [8].

Если в измерителе дальности нет возможности сформировать интерполирующий квантуемый импульс  $t_i$  внутри ЭР  $\tau_0$ , то рассмотренные алгоритмы полностью эквивалентны по точности при введении дополнительной задержки импульса ЦТ принимаемого эхосигнала на время  $t_i$ .

В этом случае статистика совпадений  $\mu_i$  временного интервала  $\tau_i$  с квантуемым импульсом  $t_i$  заменяется эквивалентной статистикой  $\mu_i$  превышения суммой  $\tau_i + t_i$  значения  $\tau_0$ , причем  $\mu_i = 1$ , если  $\tau_i + t_i > \tau_0$ , и  $\mu_i = 0$ , если сумма  $\tau_i + t_i \leq \tau_0$ .

**Заключение.** В работе исследован один из возможных подходов к решению проблемы точной дальнометрии в неследящих импульсных РЛС, в которых дальность до цели задается как МО совокупности отдельных задержек эхосигналов пачки из  $n$  импульсов.

Особенностью рассмотренного подхода является то, что предлагаемые процедуры обработки не приводят к использованию многоразрядных цифровых отсчетов интерполирующей добавки  $\tau_{ЦТ}$ , повышение точности достигается при использовании «грубых» (бинарных) отсчетов задержек эхосигналов. Обычная обработка цифровых отсчетов в указанных условиях, даже при значительных отношениях сигнал/шум, когда  $\Delta = 0$ , приводит к относительно большой погрешности измерений  $\sigma_0 = \tau_0/2\sqrt{3}$ .

Гарантированное уменьшение СКО измерений в  $n^{1/2}$  раз при произвольных отношениях сигнал/шум обеспечивает рандомизированные процедуры обработки, осуществляющие стохастическую интерполяцию положения ЦТ эхосигнала.

По мере увеличения отношения сигнал/шум, когда зона флуктуаций  $\Delta$  координатной отметки становится меньше  $\tau_0$ , появляется возможность использовать коррелированные выборки и за счет отщипательной корреляции объединены общей рекуррентной формой представления оценки, удобной для машинной обработки с помощью ЭВМ.

На основе рассмотренных частных случаев определено место предлагаемого метода измерения в кругу известных.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Горбунов Ю. Н. Модуляция фазы квантующей последовательности при измерении задержки эхосигнала // Проблемы повышения эффективности и качества радиотехнических систем.— Вып. 2: Межвуз. сб.— Свердловск: УПИ, 1979.
2. Гайсов В. Г., Горбунов Ю. Н. Двухэтапная процедура измерения временных интервалов методом статистических испытаний с обратной связью // Автометрия.— 1982.— № 2.
3. Горбунов Ю. Н. Многоэтапная процедура измерения параметров повторяющегося сигнала методом стохастического усреднения цифровых отсчетов // Автометрия.— 1985.— № 3.
4. Горбунов Ю. Н. Повышение точности фазовых измерений при стохастическом усреднении цифровых отсчетов // ВИМИ МРС, ТТЭ. Сер. ЭР.— 1981.— № 41.
5. Уайлд Д. Дж. Методы поиска экстремума.— М.: Наука, 1969.
6. Lareyre J. L. Radar a impulsions utilisant l'effet Doppler: influence de l'echantillonnage de la distance sur la probabilité de detection, interpolation de la distance // Annales des Telecommunications.— 1971.— V. 26, N 9/10.— P. 341.
7. Балашов В. П., Валитов Р. А., Вихров Г. П. и др. Автоматизация радиоизмерений.— М.: Сов. радио, 1966.
8. Гитис Э. И., Пискунов Е. А. Аналого-цифровые преобразователи.— М.: Энергоиздат, 1981.

*Поступила в редакцию 12 января 1987 г.*

УДК 531.715

Г. А. ЛЕНКОВА

(Новосибирск)

### ВЛИЯНИЕ ОРИЕНТАЦИИ УГОЛКОВОЙ ПРИЗМЫ В ИНТЕРФЕРОМЕТРЕ НА ПРЕДЕЛЫ ИЗМЕРЕНИЯ УГЛОВ

В лазерных интерферометрах для измерения углов два отражателя (уголковые призмы) закрепляются жестко на опоре симметрично оси поворота (рис. 1, а). При повороте опоры призмы смещаются относительно лучей. При этом продольная составляющая смещения (вдоль лучей) играет полезную роль, так как является мерой измерения угла, поперечная (при заданных габаритах призм) накладывает ограничение на пределы измерения углов. Поворот на угол  $\alpha$  вызывает поперечное смещение, равное [1]

$$l = 2h \sin^2(\alpha/2), \quad (1)$$

где  $h$  — расстояние между вершинами призм. Для расширения пределов измерения иногда располагают схему в двух плоскостях (рис. 2, а) так, чтобы отраженные от призм пучки лежали в плоскости, параллельной той, в которой происходит деление входного пучка. Но при этом не принимается во внимание, что при прохождении призмы пучки будут