

# ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТЕЙ

## СВЕТОЛОКАЦИОННОГО ИМПУЛЬСНОГО ИЗМЕРИТЕЛЯ ДАЛЬНОСТИ С НАКОПЛЕНИЕМ

**М**етод накопления локационной информации применялся и до появления лазерной локации. Однако реализация этого метода в лазерной локации (актуального для маломощных лазеров) стала возможной только при высокой частоте повторения зондирующих импульсов (до 1000 Гц), обеспечиваемой п/п лазерами. В работе авторы дают разностороннюю оценку эффективности измерителей дальности.

### ПОТЕНЦИАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ НАКОПИТЕЛЯ

При оценке возможностей метода накопления сигналов в лазерных локациях наиболее универсальным является теоретический анализ, аппарат которого был хорошо разработан в радиолокации [1–3]. Он позволяет оценить потенциальные характеристики накопителя.

Задача о накоплении формулируется так. Диапазон измеряемых дальностей  $\Delta R$  разбивается на  $m$  равных интервалов  $\Delta r = \Delta R/m$ . Все интервалы считаются статистически независимыми и рассматриваются как каналы дальности, где проводится обработка (накопление) локационной информации. Считается, что измеряемый сигнал находится в одном из таких каналов, например  $j$ -м.

Для получения результата измерения проводится  $N$  зондирований дальности со статистической обработкой  $i$ -го сигнала данных в каждом  $j$ -м канале. На выходе приемника существует смесь сигнала амплитудой  $S$  и шума с эффективным значением  $\sigma$ . При  $i$ -м зондировании аналоговая информация с выхода приемника преобразуется в цифровую путем одноуровневого порогового квантования (ОПК) или многоуровневого квантования (МПК) сигнала.

ОПК называется бинарным:  $i$ -му сигналу  $j$ -го канала дальности присваивается значение  $k_{ij} = 0$ , если  $S_{ij} \leq U_{j0}$ , где  $U_{j0}$  – аналоговый порог квантования, или  $k_{ij} = 1$ , если  $S_{ij} > U_{j0}$ . Эти значения суммируются (накапливаются) в каждом  $j$ -м канале на периоде из  $N$  зондирований, формируя суммы  $K_j = \sum_{i=1}^N k_{ij}$ .

Если  $K_j > K_{j0}$  – порогового уровня, то принимается решение, что дальность до цели определяется  $j$ -м каналом дальности и равна:  $R = j \cdot \Delta r + R_0$ , где  $R_0$  – начало диапазона измеряемых дальностей.

Качество статистической обработки при накоплении в  $j$ -м канале определяется вероятностями правильного обнаружения  $D_j$  и ложной тревоги  $F_j$ , зависящими от параметров  $\sigma$ ,  $S_j$ ,  $U_{j0}$  и  $K_{j0}$ .

При бинарном ОПК и нормальном распределении шума решение сводится к применению формулы Бернулли [4]:

$$F_j = \sum_k C(N, k) p^k q^{N-k}, \quad D_j = \sum_k C(N, k) p_c^k q_c^{N-k},$$

где  $k = k_0 \dots N$ ;  $C(N, k)$  – число сочетаний из  $N$  по  $k$ ;  $p = 1 - \Phi(U_{j0}/\sigma)$  – вероятность превышения порога  $U_{j0}$  шумом;  $q = 1 - p$ ;  $p_c = 1 - \Phi[S - U_{j0}]/\sigma$  – вероятность превышения порога  $U_{j0}$  смесью сигнала и шума;  $q_c = 1 - p_c$ ;  $\Phi(x)$  – функция нормального распределения вероятностей (ФНРВ) [4].

При больших значениях  $Npq$ , используя формулу Муавра-Лапласа [4], получим:

$$F_j \cong 1 - \Phi(x_p), \quad D_j \cong 1 - \Phi(x_{pc}), \quad (1)$$

где аргумент  $x_p = (k_0 - Np)/\sqrt{Npq}$ , а  $x_{pc} = (k_0 - Np_c)/\sqrt{Npq}$ .

Существует оптимальная величина порога накопления  $k_0 \cong 1,5/\sqrt{N}$  [2,3], обеспечивающая максимальную величину  $D$  при фиксированном значении  $F$ .

Указанная процедура расчета имеет ряд существенных недостатков:

- она годится только для бинарного ОПК и непригодна для расчета многоуровневых накопителей;

- не учитывается сложный вид сигнала, который может занимать несколько каналов дальности;
- не учитывается случайное запаздывание сигнала при отсутствии синхронизации между посылкой зондирующего импульса и тактовой частотой ( $f\Delta = c/2\Delta t$ );
- не учитывается корреляция шума в соседних каналах;
- нет возможности исследовать процедуры, применяемые после накопления данных, например обработку данных для формирования оценок измеряемых параметров;
- не позволяет исследовать нелинейные явления, вызванные перегрузкой приемного тракта, а также мультипликативными шумами при генерации и прохождении сигнала по тракту.

Учитывая это, разработана методика компьютерного моделирования, свободная от этих недостатков.

### КОМПЬЮТЕРНАЯ МОДЕЛЬ НАКОПИТЕЛЯ

Эта модель разработана на базе ПО MATLAB 7.0. В ней сигнал описан выражением  $S(t)$ , где  $S(t) = 0$  при  $t \leq t_3$ , или  $S(t) = A(t-t_3)^2 \exp[-b(t-t_3)]$  при  $t > t_3$ . Здесь  $t_3$  – задержка сигнала,  $A$  – амплитудный множитель,  $b$  – коэффициент, зависящий от длительности сигнала. При этом  $t_3$  может быть фиксированным (синхронный старт) или случайным в каждом цикле зондирования значением, равномерно распределенным внутри интервала  $\Delta t$  (независимый старт). Возможна также имитация ограничения сигнала.

Шум (нормализованный на выходе для удобства интерпретации результатов) формируется из "белого" шума путем пропускания его через "линейный тракт" модели, который имитируется двумя интегрирующими и одним дифференцирующим аperiodическими звеньями с регулируемыми постоянными времени.

Варианты модели содержат имитаторы одноуровневых, двухуровневых и четырехуровневых пороговых преобразователей с независимо регулируемыми уровнями. Четырехуровневой достаточно для обеспечения накопления с эффективностью, близкой к теоретическому пределу. Процедура формирования накопленного уровня такова, что если в текущем цикле зондирования сигнал выше положительного уровня, то содержимое накопителя увеличивается на 1, а если ниже отрицательного уровня, то оно уменьшается на 1.

Оценка временного положения осуществляется путем вычисления центра тяжести накопленного массива интервалов. Это обусловлено имеющимся отношением длительности сигнала к интервалу  $\Delta t$ . При другом таком отношении способ временной фиксации может быть иным. Оценка временного положения осуществляется путем вычисления центра тяжести массива накопленных сумм, то есть по формуле:

$$T_3 = (j-3) + (\sum |k_{j-2} + k_{j-2+1}|) / (\sum |k_{j-3+1} + k_{j-3+1}|), \quad (2)$$

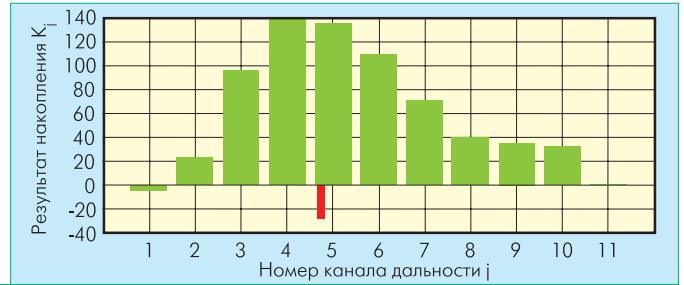


Рис. 1 Результаты ( $K_j$ ), полученные в двухуровневом накопителе при  $N = 200$  и отношении  $C/\text{Ш}$  на входе  $S = 1$ . Внизу указан центр тяжести накопленного массива

где суммирование ведется по  $l$  от 1 до 5 (первая сумма) и от 1 до 6 (вторая сумма),  $k_m$  – весовые коэффициенты, а  $K_m$  – накопленные суммы.

### РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Предложенная модель позволила определить в результате исследований потенциальные характеристики различных вариантов накопителей и их зависимость от параметров накопителей.

Часть полученных результатов накопления  $K_j$  в 10 каналах дальности представлена на рис.1 и 2. На рис.1 представлены значения  $K_j$  ( $j = 1...10$ ) двухуровневого накопителя при  $N = 200$  и отношении  $C/\text{Ш}$  на входе  $S = 1$ . По этим данным проводится пороговое обнаружение сигнала, а после принятия решения и при наличии сигнала определяется его временное положение в соответствии с формулой (2). Для наглядности внизу указано положение центра тяжести накопленного массива.

На рис.2 представлены реализации  $K_j$  ( $j = 1...10$ ) двухуровневого накопителя при  $N = 200$  в отсутствие сигнала ( $S = 0$ ). Эти данные необходимы для определения математического ожидания ( $M_0$ )  $M_k$  и среднеквадратического отклонения (СКВО)  $\sigma_k$  шума на выходе накопителя. Они определяют необходимый объем памяти и величину цифрового порога  $K_0$ , от которого зависит вероятность ложной тревоги  $F_j$  в каждом канале накопления:  $K_0 = M_k + \Phi^{-1}(1-F_j) \sigma_k$ , где  $\Phi^{-1}(x)$  – функция, обратная ФНРВ.

При симметричном положении пороговых уровней  $U_{02} = -U_{01}$  цифровой шум на выходе центрируется, и  $M_k = 0$ . Для бинарного накопителя, имеющего только один пороговый

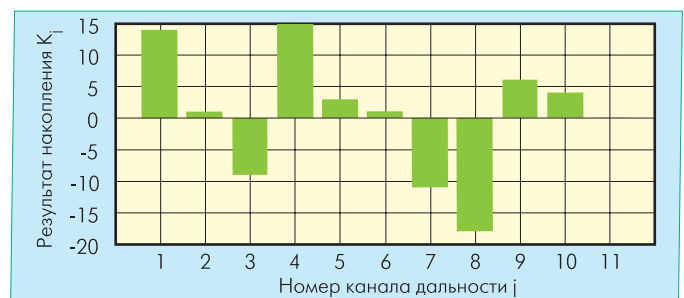


Рис.2 Результаты ( $K_j$ ), полученные в двухуровневом накопителе при  $N = 200$  и отношении  $C/\text{Ш}$  на входе  $S = 0$

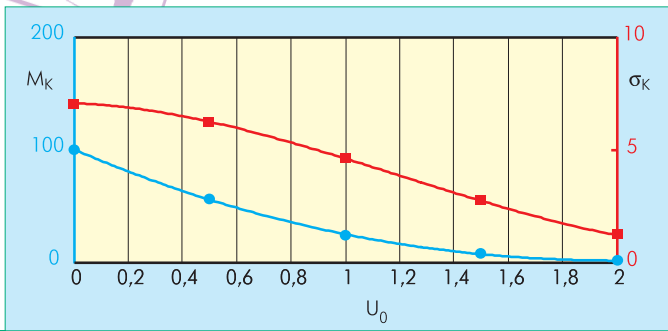


Рис.3 Зависимости  $M_k(U_0)$  и  $\sigma_k(U_0)$  бинарного накопителя от отношения порог/шум  $U_0$  при объеме накопления  $N = 200$

уровень, это невозможно. На рис.3 приведены зависимости  $M_k(U_0)$  и  $\sigma_k(U_0)$ . На графиках представлена интерполяция кубическими сплайнами данных, полученных с помощью компьютерной модели. Величина  $\sigma_k(U_0)$ , полученная в результате моделирования, совпадает для малых  $U_0$  с тем, что дает формула Муавра-Лапласа, а при  $U_0 > 1,5$  она несколько меньше.

На рис.4 приведены зависимости  $\sigma_k(U_0)$  для двухуровневого и четырехуровневого накопителей при симметричном равноудаленном положении уровней (маркеры ● и ▼). На оси абсцисс отложено расстояние между соседними уровнями. Зависимость  $\sigma_k(U_0)$  для четырехуровневого накопителя соответствует порогам  $U_{01} = 0, U_{02} = 0, U_{03} = U_0, U_{04} = -U_0$  (кривая с маркерами ■).

Из приведенных графиков видно, что при  $\Delta U_0 = 0$  величина  $\sigma_k$  пропорциональна числу уровней. Это значит, что при наличии ограничений на объем выделяемой памяти оптимальным будет двухуровневый преобразователь с симметричным положением пороговых уровней, так как для одноуровневого преобразователя нужен начальный объем памяти  $M_k > 0$ . Двухуровневый преобразователь требует и меньшего динамического диапазона, равного отношению максимального объема памяти к цифровому порогу  $K_0$ , пропорциональному  $\sigma_k$ .

### ЭФФЕКТИВНОСТЬ НАКОПЛЕНИЯ

Под эффективностью накопления  $E$  понимается улучшение отношения С/Ш в результате накопления  $N$  зондирований по сравнению с однократным зондированием, то есть

$$E = (K_{\max}/\sigma_k)/(S_{\max}/\sigma)$$

где  $K_{\max}$  – средняя величина накопленного значения  $K_j$  в канале с максимальным значением  $K$  (в точке максимума накопленного массива);  $\sigma_k$  – СКВО  $K_j$  в точке максимума;  $S_{\max}$  – амплитуда сигнала на выходе приемного тракта;  $\sigma$  – среднее квадратическое значение шума на выходе приемного тракта.

На модели исследовались следующие варианты задачи:

- а) эффективность бинарного накопителя в зависимости от величины  $U_0/\sigma$ ;
- б) эффективность двухуровневого накопителя при симметричном положении порогов относительно нулевого уровня:  $U_1 = U_0/\sigma, U_2 = -U_0/\sigma$ ;
- в) эффективность четырехуровневого накопителя при  $U_1 = 0, U_2 = U_0/\sigma, U_3 = -0, U_4 = -U_0/\sigma$ ;
- г) эффективность четырехуровневого накопителя при равноудаленном размещении порогов:  $U_1 = U_0/\sigma, U_2 = 3U_0/\sigma, U_3 = -U_0/\sigma, U_4 = -3U_0/\sigma$ .

Зависимости  $E(U_0)$  для указанных вариантов при  $N = 200$  приведены на рис.5 (пунктиром показан теоретический предел –  $\sqrt{200}$ ).

Приведенные зависимости позволяют сделать следующие выводы:

- при оптимальном размещении порогов двухуровневый и четырехуровневый накопители фактически реализуют теоретический предел;
- эффективность одноуровневого накопителя при нулевом относительном пороге составляет 83% от теоретического предела;
- при размещении порогов на нулевом уровне все варианты вырождаются и соответствуют одноуровневому случаю;
- подтверждаются выводы о предпочтительности использования двухуровневого накопителя;
- оптимальная область работы накопителей достаточно велика, чтобы обеспечить широкое поле допусков на величину выставляемых пороговых уровней;
- требует решения задача поддержания  $M_k$  на нулевом уровне, например с помощью шумовой автоматической регулировки пороговых уровней [5].

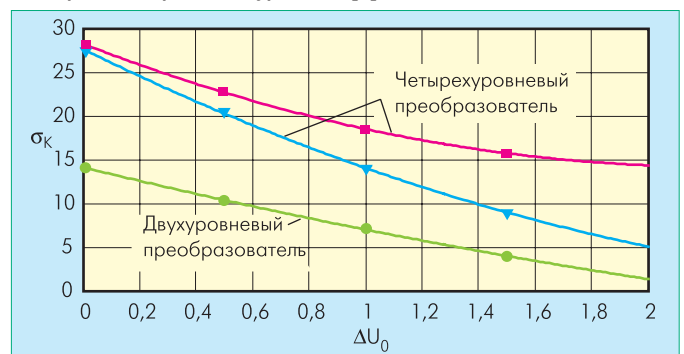
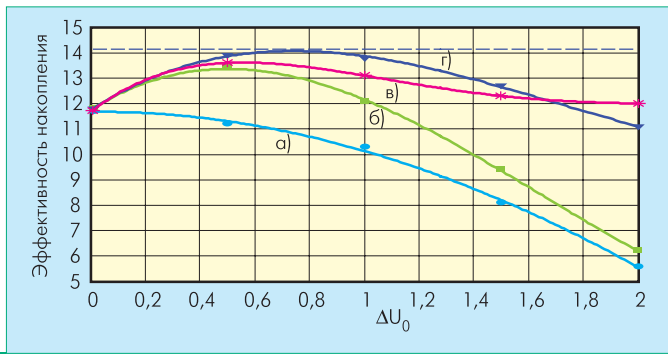


Рис.4 Зависимость СКВО накопленных сумм от расстояния между пороговыми уровнями  $\Delta U_0$  для двух- и четырехуровневого преобразователей



**Рис.5** Эффективность накопления при разной структуре накопителей для вариантов а) – г) в зависимости от положения пороговых уровней

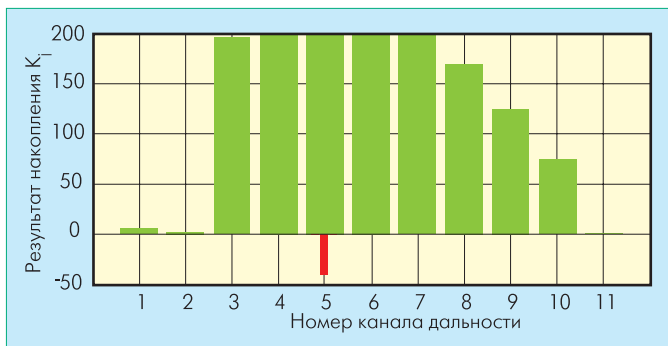
### ТОЧНОСТЬ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВРЕМЕННОГО ПОЛОЖЕНИЯ ИМПУЛЬСА

Оценка  $T_3$  (2) временного положения импульса – случайная величина, характеризуемая систематическим сдвигом и СКВО от истинного значения  $t_3$ , зависящими в общем случае от амплитуды и других параметров сигнала. Эти зависимости получены с помощью модели для двух случаев:

а) асинхронный старт: момент излучения зондирующего сигнала не привязан к тактовой частоте, поэтому задержка  $t_3$  может равновероятно принимать любые значения в пределах интервала  $\Delta t$ ;

б) синхронный старт: зондирующий сигнал синхронизирован с тактовой частотой, и его сдвиг  $\Delta t_3$  относительно тактового импульса – постоянная величина.

Зависимость статистических характеристик оценки  $T_3$  от амплитуды сигнала (отношения С/Ш) была исследована для обоих случаев. На рис.6 показан результат накопления при большом отношении С/Ш ( $S = 10$ ) для двухуровневого накопителя с оптимальным положением пороговых уровней ( $U_{01} = \sigma$ ,  $U_{02} = -\sigma$ ) при асинхронном старте и объеме накопления  $N = 200$ . Видно, что "вершина" массива искажена в результате ограниченного объема зондирований  $N$ . При этом, однако, оценка временного положения сигнала по формуле (2) достаточно стабильна. На рис.7 представлена зависимость оценки  $T_3$  от  $S$  при тех же условиях. Видно, что в линейной области накопителя при  $S < 2$ , когда  $M_k < N$ , оценка  $T_3$  практически не зависит от  $S$ .



**Рис.6** Массив накопленных данных. Асинхронный старт (двухуровневый накопитель:  $U_{01} = \sigma$ ,  $U_{02} = -\sigma$ ,  $N = 200$ , при большом отношении сигнал/шум на входе  $S = 10$ )

При синхронном старте существует нелинейная зависимость оценки  $T_3$  от сдвига сигнала относительно тактовой последовательности, определяющей разделение каналов дальности. Эта зависимость показана на рис.8. Максимальное отклонение оценки достигает 0,1 интервала дальности.

Данные по СКВО оценки  $T_3$  от отношения С/Ш представлены на рис.9. Они могут быть уточнены и расширены применительно к конкретному типу накопителя и его параметрам.

Приведенные выше результаты получены для весовых коэффициентов в формуле (2)  $k_m = 1$ . Анализировались также и другие комбинации весовых коэффициентов, приведенные в таблице.

Как показали результаты моделирования, наименьшая СКВО временной фиксации, а также максимальная линейность характеристики, изображенной на рис.7, обеспечивается при  $k_m = 1$ . Влияние весовых коэффициентов на точность оценки и вопрос оптимизации коэффициентов  $k_m$  требуют отдельного рассмотрения.

Результаты исследований были использованы при создании малогабаритного лазерного дальномера ДЛ-2, используемого на низколетящих летательных аппаратах для определения профиля подстилающей поверхности с высокой разрешающей способностью.

### ВЫВОДЫ

Известный математический аппарат позволяет рассматривать только упрощенную модель и не учитывает ряд особенностей и режимов, играющих важную роль. Разработанная универсальная компьютерная модель позволяет: имитировать различные структуры накопителей; исследовать их характеристики в различных режимах; учитывать нелинейные искажения сигнала при динамических перегрузках и грамотно выбирать направления разработки на этапе рассмотрения ТЗ.

Полученные результаты моделирования позволяют сделать следующие выводы:

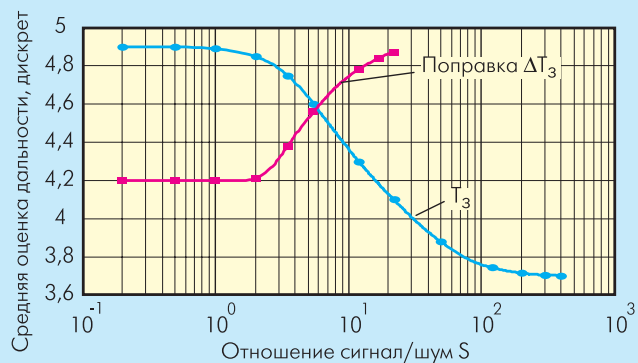
1. Бинарный накопитель, рассматриваемый в литературе [1–3], не оптимален как по обнаружительной способности, так и по аппаратной структуре.

2. Двухуровневый накопитель – комбинация двух бинарных накопителей – обладает обнаружительной способностью, близкой к теоретически предельной, что делает увеличение количества уровней до четырех и более нерациональным.

3. При симметричном положении пороговых уровней относительно нуля многоуровневые накопители обеспечивают возможность поддержания нулевого среднего накопленных

Варианты весовых коэффициентов

| m     | 1   | 2    | 3   | 4    | 5   | 6    |
|-------|-----|------|-----|------|-----|------|
| $k_m$ | 1,0 | 1,0  | 1,0 | 1,0  | 1,0 | 1,0  |
|       | 0,1 | 0,7  | 1,0 | 0,9  | 0,7 | 0,6  |
|       | 0,4 | 0,85 | 1,0 | 0,65 | 0,5 | 0,22 |
|       | 0,4 | 0,8  | 1,0 | 0,9  | 0,7 | 0,5  |



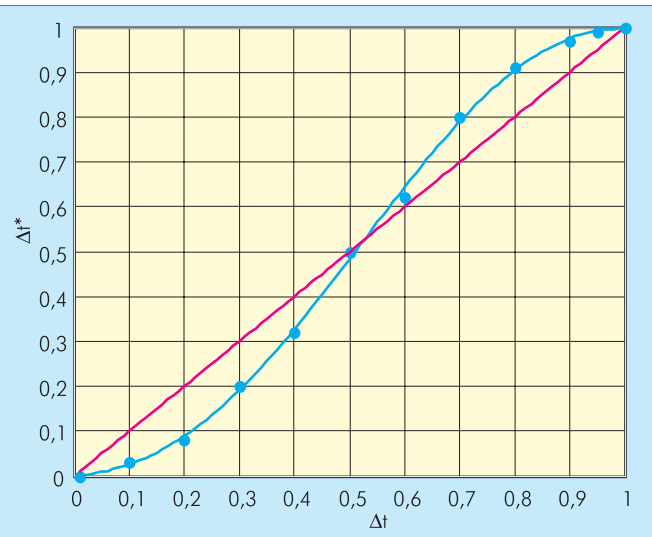
**Рис.7** Зависимость оценки дальности  $T_3$  (среднее значение) от отношения  $C/\text{Ш}$   $S$  (двухуровневый накопитель:  $U_{01} = \sigma$ ,  $U_{02} = -\sigma$ ,  $N = 200$ )

данных, что упрощает обработку данных и расширяет динамический диапазон. Для обеспечения нулевого среднего при эксплуатации устройств можно рекомендовать метод шумовой автоматической регулировки порогов [5].

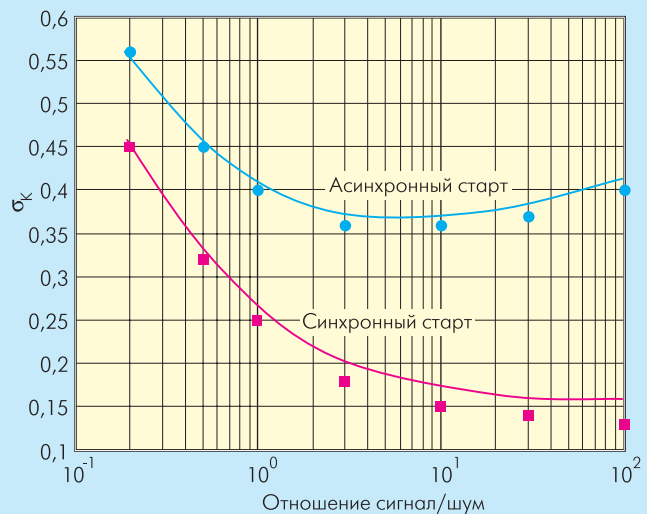
4. Если сигнал перекрывает по длительности один или несколько интервалов (каналов дальности), то временное положение сигнала можно определить, вычисляя положение центра тяжести накопленного массива. Модель позволяет также оценивать положение сигнала путем аппроксимации накопленных данных кубическим полиномом, приближенным по методу наименьших квадратов.

5. Если импульсная характеристика приемно-усилительно-го тракта соответствует форме длинного сигнала, то шумовые выборки каналов дальности коррелированы, что нужно учитывать для получения корректного результата.

6. С ростом отношения  $C/\text{Ш}$  на входе накопителя наблюдается систематический уход оценки дальности, который можно компенсировать введением поправки, пропорциональной количеству переполненных ячеек памяти в соседних каналах дальности, или исключить путем автоматического перехода в моноимпульсный режим.



**Рис.8** Зависимость усредненной оценки  $\Delta t^*$  сдвига сигнала от величины сдвига  $\Delta t$  при синхронном старте (двухуровневый накопитель:  $U_{01} = \sigma$ ,  $U_{02} = -\sigma$ ,  $N = 200$ ,  $A = 1,5$ )



**Рис.9** Зависимость СКВО оценки дальности от отношения  $C/\text{Ш}$  (двухуровневый накопитель:  $U_{01} = \sigma$ ,  $U_{02} = -\sigma$ ,  $N = 200$ )

7. У накопителя с синхронным стартом систематическая ошибка временной фиксации зависит от положения сигнала относительно тактовой последовательности.

8. СКВО временной фиксации при синхронном старте значительно меньше, чем при асинхронном.

9. Полученные результаты использованы в разработках НИИ "Полус" и компаний "Скат-Р" и "ДжетВЕСТ".

## ЛИТЕРАТУРА

1. Клюев Н.Ф. Обнаружение импульсных сигналов с помощью накопителей дискретного действия. — М.: Сов. радио, 1963.
2. Лезин Ю.С. Оптимальные фильтры и накопители импульсных сигналов. — М.: Сов. радио, 1969.
3. Ширман Я.Д., Манжос В.Н. Теория и техника обработки радиолокационной информации на фоне помех. — М.: Радио и связь, 1981.
4. Гнеденко Б.В. Курс теории вероятности. — М.: Наука, 1969.
5. Вильнер В.Г. Проектирование пороговых устройств с шумовой стабилизацией порога. — Оптико-механическая промышленность, 1984, №5.