

общий уровень потерь увеличивается незначительно (рис. 3б), что дает возможность использовать этот метод для коррекции АЧХ сложных квазиоптических

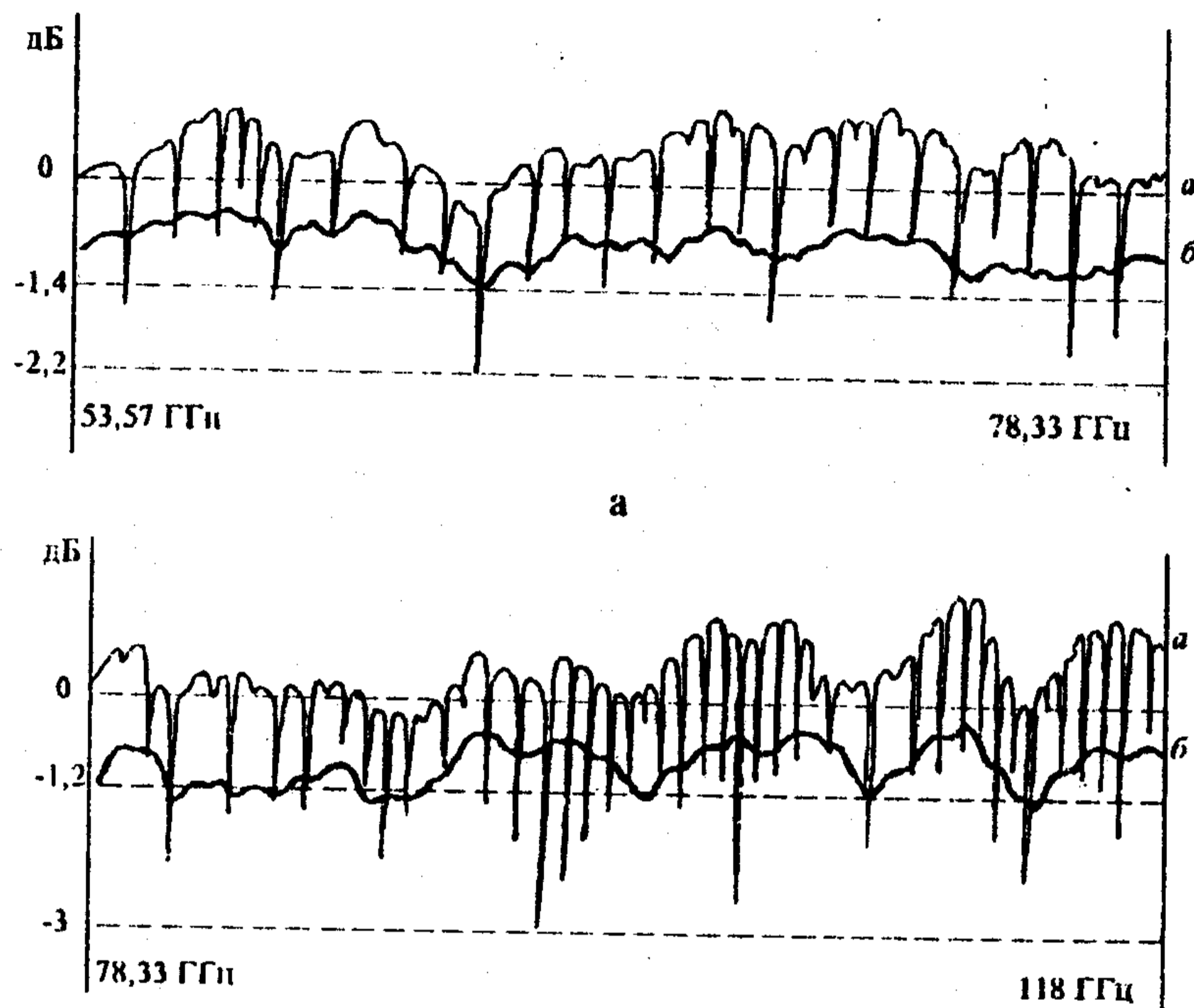


Рис. 3

СВЧ трактов МДВ в короткой части миллиметрового и субмиллиметрового диапазонах электромагнитных волн.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Электроника и радиофизика миллиметровых и субмиллиметровых радиоволн / А. Я. Усиков, Э. А. Канер, И. Д. Трутень и др. — Киев : Наук. думка, 1986. — 270 с.
2. Казанцев Ю. Н., Харлашкин О. А. Прямоугольные волноводы класса «полый диэлектрический канал» // Радиотехника и электроника, 1978. — Т. 23. — № 10. — С. 62—67.
3. Ваганов Р. Б., Матвеев Р. Ф., Мериакри В. В. Многоволновые волноводы со случайными нерегулярностями / Под ред. Б. З. Каценеленбаума. — М. : Сов. радио, 1972. — 220 с.
4. Егоров Ю. В. Частично заполненные прямоугольные волноводы. — М. : Сов. радио, 1967. — 180 с.
5. Казанцев Ю. Н. Затухание собственных волн в широком волноводе с диэлектрическим покрытием конечной толщины // Радиотехника и электроника. — 1970. — Т. 15. — № 2. — С. 52—57.

Гос. НИЦ «Фотон», г. Киев.

Поступила в редакцию 25.09.97.

УДК 621.396.96

СЛЮСАР В. П.

## ПРЕДЕЛЬНОЕ РАЗРЕШЕНИЕ ДАЛЬНОМЕРНЫХ ПРОЦЕДУР МАКСИМАЛЬНОГО ПРАВДОПОДОБИЯ

Рассмотрена аналитическая методика оценки предельной разрешающей способности многосигнальных алгоритмов максимального правдоподобия. Приведены результаты ее использования на примере импульсной дальнометрии для сигналов с огибающей  $\sin^2 x$ .

В задачах спектральной селекции для проверки разрешающей способности измерительных процедур используются искусственные тест-последовательности, что обусловлено [1] чрезмерной сложностью аналитического описания характеристик большинства методов оценивания в многосигнальных ситуациях. Это приводит к невозможности исследования алгоритмов сверхразрешения аналитическим путем, без их экспериментальной прогонки по выборочным моделям сигналов. Целью статьи является рассмотрение аналитической методики выявления потенциальной разрешающей способности процедур максимального правдоподобия на примере импульсной дальнометрии, как наименее исследованной области приложения алгоритмов сверхразрешения.

Под пределом разрешения будет подразумеваться расстояние  $b_{nm}$  между соседними источниками, при котором для заданного отношения сигнал/шум выполняется условие:

$$b_{nm} \geq 3 \cdot \sigma_n + 3 \cdot \sigma_m, \quad (1)$$

где  $\sigma_n$  — нижняя граница Крамера—Рао для СКО несмещенной оценки того параметра  $n$ -го источника, по которому производится разрешение.

Этот показатель позволяет обеспечить предельно малую вероятность совпадения оценок параметров сигналов, составляющую около  $0,9 \cdot 10^{-3}$ . Из анализа (1) следует, что для расчета предельной разрешающей способности метода максимального правдоподобия достаточно определить нижнюю границу Крамера—Рао для многосигнальной ситуации приема. Поэтому отправной точкой предлагаемого подхода является вывод аналитического выражения для предельно достижимой дисперсии ошибки оценивания интересующих параметров  $M$  источников.

С этой целью воспользуемся блочной записью информационной матрицы Фишера  $I$  для комплексной модели сигнала и некоррелированных шумов [2].

Ограничимся случаем синфазного взаимодействия импульсов, что позволит перейти в  $I$  к вещественным значениям величин. Сами же дисперсии ошибок оценивания будут определены в результате обращения матрицы  $I$ , например, при большом числе сигналов, по методу расширенной матрицы [3].

При заданной модели сигналов и конкретной ситуации их взаимодействия следует вычислить элементы матрицы Фишера, а затем произвести ее обращение. Перебирая возможные варианты взаимного расположения импульсов и манипулируя отношением сигнал/шум, можно найти ситуации, при которых условие (1) перестает выполняться. Это и будет пределом разрешения для заданного количества источников  $M$ .

Чтобы исходные условия сделать регулярными, ограничимся равным отношением сигнал/шум для всех сигналов и равномерным расположением их по дальности при одинаковой длительности. В этом случае разрешающая способность в двухсигнальной ситуации определяется величиной  $3 \cdot (\sigma_1 + \sigma_2) = 6 \cdot \sigma_{1(2)}$ , так как  $\sigma_1 = \sigma_2$ . При  $M \geq 3$  источниках на результат разрешения влияет точность оценивания параметров внутренней группы сигналов, условия измерения которых при большом числе наложений и достаточно протяженном импульсе наихудшие. Так, при  $M = 3$  показателем разрешения является утроенная сумма СКО  $\sigma_2 + \sigma_{1(3)}$ , поскольку  $\sigma_2 > \sigma_3 = \sigma_1$ . Для четырех равномошных источников  $\sigma_2 = \sigma_3 > \sigma_1 = \sigma_4$ , поэтому о качестве разрешения позволяет судить величина  $6 \cdot \sigma_{2(3)}$ . Наконец, при длительности импульса, к примеру, в 100 отсчетов и более пятисигнальная ситуация характеризуется соотношением  $\sigma_3 \geq \sigma_2 = \sigma_4 \geq \sigma_1 = \sigma_5$ , что позволяет при анализе разрешающей способности ограничиться лишь контролем значения  $3 \cdot (\sigma_3 + \sigma_{2(4)})$ .

Для проверки правильности функционирования процедур обращения информационных матриц желательно использовать контрольные примеры с заранее предсказуемым результатом в отношении любых их размерностей. В ходе исследований в качестве таких тестов были использованы матрицы  $A$  порядка  $n$  с нулевыми элементами на главной диагонали и единицами вне ее и обратные им матрицы [4].

В качестве исходных данных, характеризующих различия временного положения сигналов, для анализа предельного разрешения при измерении дальности непосредственно по отсчетам АЦП достаточно задавать только

взаимные перекрытия соседних по времени импульсов  $d_{nm}$ . Глубина же взаимного наложения остальных вычисляется по формулам:  $d_{nk} = d_{nm} + d_{mk} - N$ , где  $N$  — длительность сигнала в отсчетах АЦП,  $d_{nk} = N - b_{nk}$ ,  $b_{nk}$  — расстояние между  $n$ -м и  $k$ -м источниками. К примеру, для трех сигналов по известным  $d_{12}$  и  $d_{23}$  получим:  $d_{13} = d_{12} + d_{23} - N$ .

Перейдем к обсуждению результатов в случае импульсов с огибающей  $\sin^2 x$ . В отличие от [2] будем ориентироваться на измерение дальности без дополнительного стробирования отсчетов АЦП. В этом случае значения элементов матрицы  $S(Z)$  [2] можно выразить в виде:

$$S_t(z_m) = \begin{cases} \sin^2(t - z_m)x & \text{при } z_m \leq t < z_m + N \\ 0 & \text{при } t < z_m \text{ и } t \geq z_m + N \end{cases}$$

где  $t$  — порядковый номер элемента матрицы  $S(Z)$  в столбце,  $t = 1, \dots, z_M + N$ ;  $z_m$  — отсчитанный от начала первого сигнала  $z_1 = 1$  порядковый номер первого из отсчетов АЦП в пределах существования  $m$ -го радиопульса;  $N$  — длительность сигнала в отсчетах АЦП;  $m$  — номер элемента матрицы  $S(Z)$  в строке;  $x = \pi/N$ .

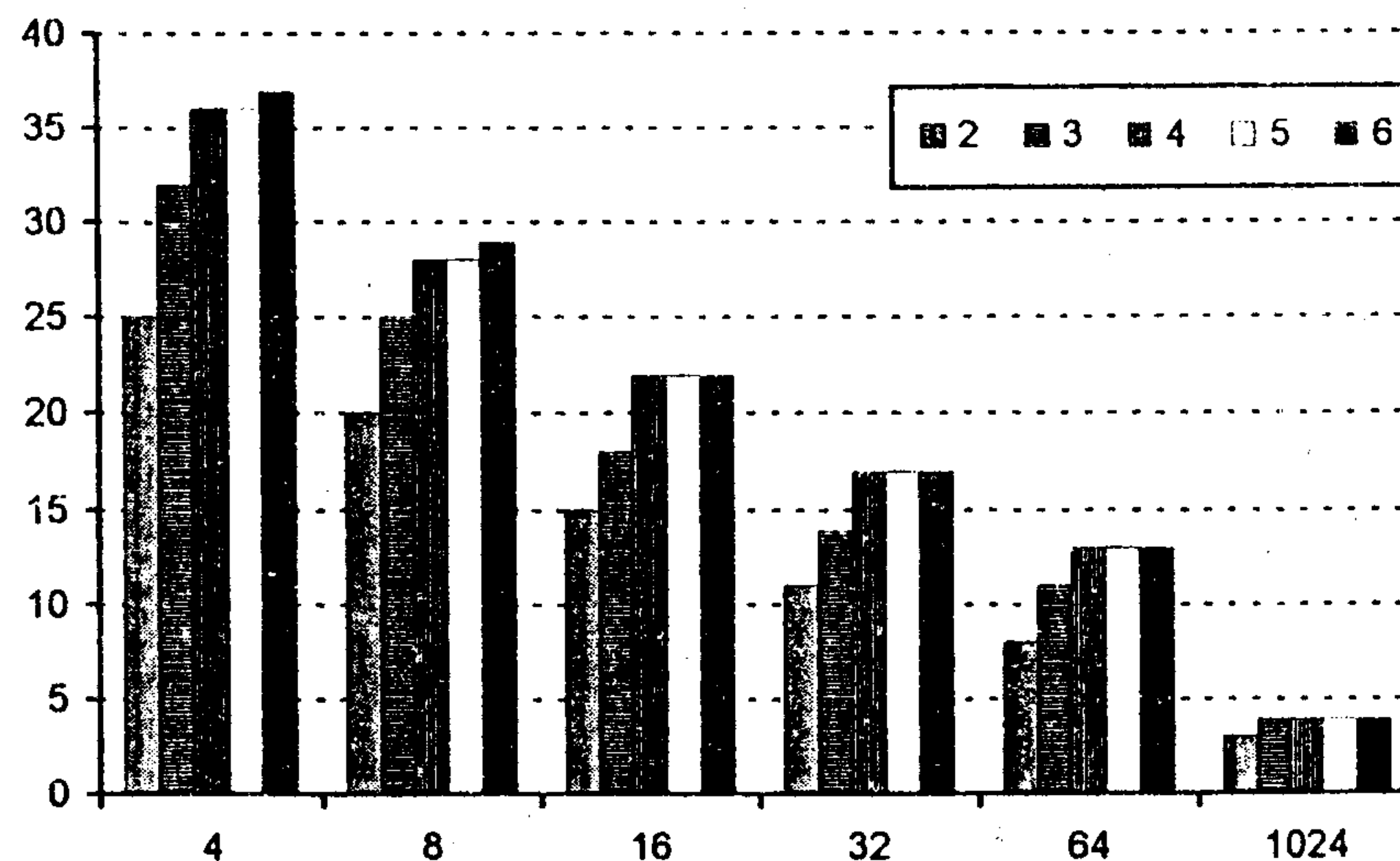


Рис. 1

На рис. 1 представлены результаты исследований, характеризующие предельное разрешение двух-шести  $\sin^2$ -импульсов длительностью по основанию 100 отсчетов АЦП. Вдоль горизонтальной оси указано отношение

сигнал/шум по напряжению в размах, которое задавалось одинаковым для всех сигналов (в качестве характеристик шумов использовалось их СКО в квадратурной составляющей). Цифры в правой части рисунка, комментирующие маски прямоугольников, соответствуют количеству разрешаемых импульсов. По вертикальной оси в отчетах АЦП отложено расстояние между равномерно расположенными по дистанции источниками, при котором начинает соблюдаться условие (1). Как и следовало ожидать, разрешающая способность возрастает по мере увеличения энергетики сигналов для любого их количества. При отношении сигнал/шум 60 дБ (1024 раза) по напряжению устойчивое разрешение ограничено интервалом между соседними импульсами, составляющим 3—4 % от их длительности.

Отмечалось практически полное (с учетом округления) совпадение предельно допустимых интервалов между соседними во времени сигналами при  $M > 4$ . Это объясняется тем, что при указанном количестве источников и равномерном их распределении по дальности сумма СКО оценок времени прихода сигналов внутренней группы в (1) незначительно меняется с ростом их числа.

Поскольку одной из возможных областей применения дальномерных процедур сверхразрешения является построение дальностных портретов целей, важно следующее.

При решении задач распознавания анализ характеристик разрешения должен охватывать не только СКО оценок дальности, но и ошибок измерения амплитуд сигналов. Например, при отношении сигнал/шум 1024 в случае  $M = 4$  предельное разрешение по дальности, как было указано, составляет 4% от длительности импульса, тогда как СКО оценок амплитуд сигналов достигает 15—20%. Такая точность вряд ли приемлема для качественного построения яркостного портрета цели. В то же время при удвоении интервала между сигналами погрешность определения амплитуд внутренних импульсов падает почти до 3,5%. Это следует учитывать при решении задач пересчета оценок дальности в значения других параметров через обобщенные амплитуды сигналов. Очевидно, что большая погрешность оценивания амплитуд каждого импульса, а значит, и обобщенных амплитуд, приведет к заметным ошибкам измерения остальных координат.

Можно отметить также независимость СКО оценок времени задержки одних сигналов от отношения сигнал/шум других. При неравномерном распределении источников по дистанции пределы разрешения, указанные на рис. 1, могут быть уменьшены. Скопление части импульсов в одной временной области «уравновешивается» удалением остальных на большее расстояние. Например, предел разрешения для трех источников, равный 32 отсчетам (сигнал/шум 4), можно снизить до 25, «уравновесив» пару сигналов с интер-

валом 25 посредством смещения третьего импульса на 75 отсчетов от начала среднего сигнала.

Картина качественно сохраняется и при других длительностях импульсов. Так, на рис. 2 представлены результаты, соответствующие 1000-отсчетному  $\sin^2$ -сигналу. По сравнению с рис. 1 заметно улучшение разрешения в процентном выражении. Так, для отношения сигнал/шум 1024 в двухсигнальной ситуации предельный интервал между источниками сократился до 1,7% от длительности импульса. Такой результат хорошо согласуется с известным в спектральном оценивании 2%-м пределом разрешения процедуры MUSIC для той же энергетики [5].

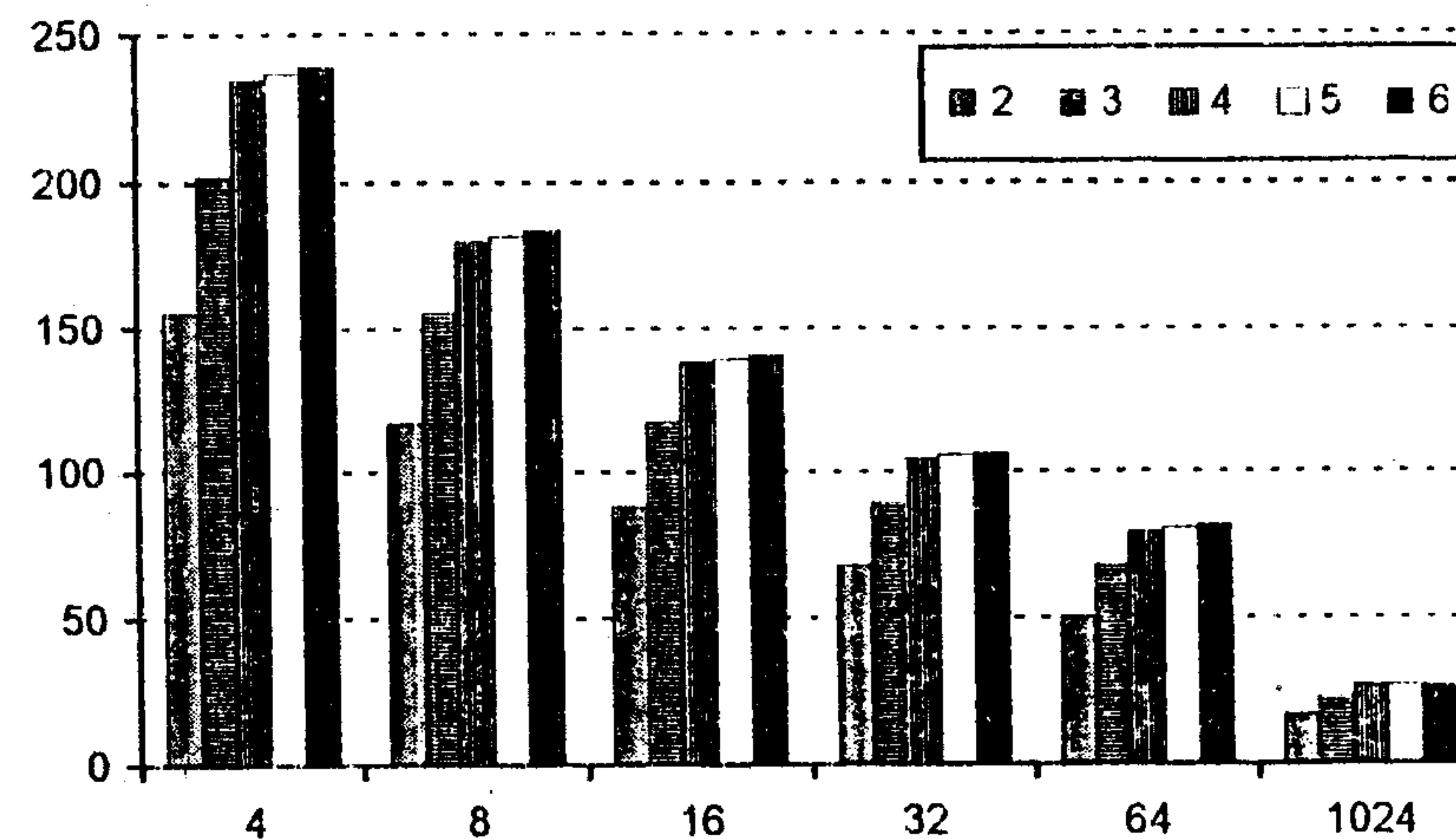


Рис. 2

Примечательно, что в трехсигнальной ситуации для достижения предела разрешения, присущего двухсигнальной модели, требуется удвоение отношения сигнал/шум по напряжению. По данным рис. 1 эта закономерность проявилась не столь отчетливо. Характерно, что столь специфичная взаимосвязь двух- и трехсигнальных процедур измерения сохраняется также при других определениях предела разрешения. На рис. 3 для 1000-отсчетного сигнала прямоугольниками показаны интервалы, удовлетворяющие условию  $b_{nm} \geq 2 \cdot \sigma_n + 2 \cdot \sigma_m$ , причем, цифровые обозначения остались прежними. Отсюда можно сделать принципиальный вывод о целесообразности противопоставления двухцелевому алгоритму «трехцелевика» с тем же пределом разрешения лишь после сокращения расстояния «РЛС-групповая цель» в  $\sqrt{2}$

раз. Подобная адаптация может существенно снизить аппаратные затраты на реализацию многосигнальной обработки.

Важнейшим результатом проведенных исследований является подтверждение возможности разрешения по условию (1) 5—6 источников, равномерно расположенных в импульсном объеме протяженностью 100 отсчетов АЦП, если расстояние от них до РЛС не превышает  $0,5 \cdot D_{\max}$ . Здесь  $D_{\max}$  — дальность, с которой по типовому отражателю в приемнике РЛС обеспечивается отношение сигнал/шум 12 дБ по напряжению. При более плотной «упаковке» эхо-сигналов, например, с равномерным интервалом в 13% от их длительности, зона разрешения 5—6 импульсов для 100-отсчетного сигнала сокращается до  $0,25 \cdot D_{\max}$ .

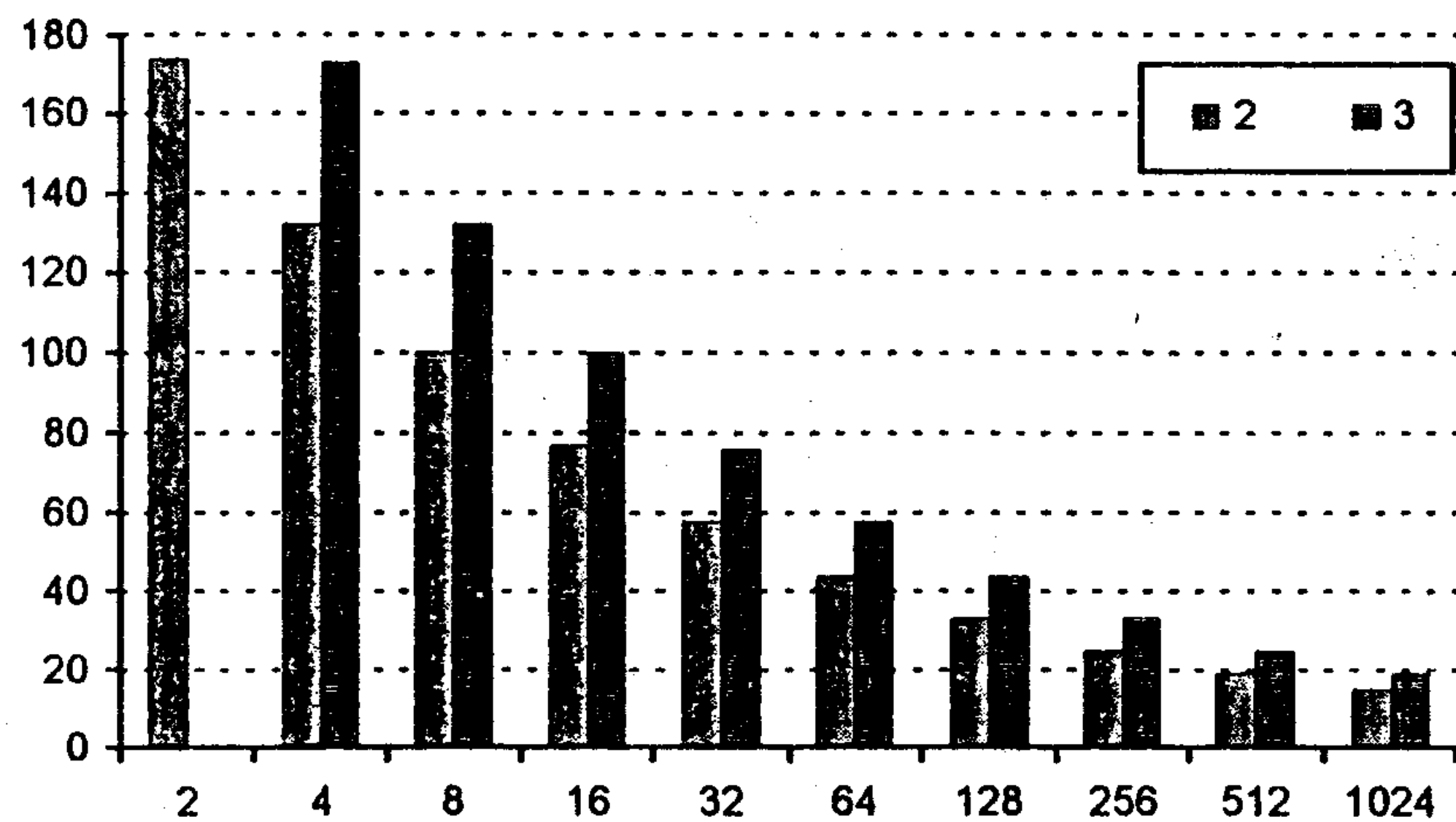


Рис. 3

Таким образом, рассмотренная методика позволяет разумно распределить по дистанции рубежи постановки задач разрешения  $M$  источников, варьируя величиной  $M$  по дальности. Кроме того, с ее помощью становится возможным наложить ограничения на пределы итерационного перебора оценок времени прихода сигналов в зависимости от амплитуды сигнальной смеси.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Марпл-мл. С. Л. Цифровой спектральный анализ и его приложения / Пер. с англ. — М.: Мир, 1990. — 584 с.
2. Слюсар В. И. Синтез алгоритмов измерения дальности  $M$  источников при дополнительном стробировании отсчетов АЦП // Радиоэлектроника. — 1996. — № 5. — С. 55—62. (Изв. высш. учеб. заведений).

3. TURBOPASKAL: Алгоритми і програми. Чисельні методи в фізиці та мате-матиці: Навч. посібник / А. Б. Бартков та ін. — К.: Вища шк., 1992. — С. 87—90. (247 с.).
4. Фаддеев Д. К., Саминский И. С. Сборник задач по высшей алгебре. — М.: Гос. изд-во техн.-теорет. лит., 1956. — С. 69, 192. (308 с.).
5. Jamada H., Ohmiya M., Ogawa J., Itoh K. Superresolution techniques for time-domain measurements with a network Analyzer // IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1991. — Vol. 39. — No 2. — P. 177—183.

Киев.

Поступила в редакцию 20.03.97.

УДК 621.385.12:621.382.2

КАНЕВСКИЙ В. И., ЧАЙКА В. Е.

### ИССЛЕДОВАНИЕ ОТРИЦАТЕЛЬНОЙ ДИНАМИЧЕСКОЙ ПРОВОДИМОСТИ В ВАКУУМНЫХ ДИОДНЫХ СТРУКТУРАХ С ОСТРИМ КАТОДОМ В ВИДЕ $p^{++}$ - $n$ -ПЕРЕХОДА

Численно исследована работа вакуумного диода с острым катодом, острие которого выбрано в виде обратно-смещенного  $p^{++}$ - $n$ -перехода. Показана возможность электрической перестройки частотного диапазона отрицательной динамической проводимости на основе управляемого лавинного пробоя в  $p^{++}$ - $n$ -переходе. Конструкция катода позволила расширить область отрицательной динамической проводимости данного диода в диапазоне от субмиллиметровых длин волн до дальнего инфракрасного диапазона.

В последние годы исследуются возможности создания источников колебаний миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов на основе матричных острых катодов с полевой эмиссией [1]. Как правило, рассматриваются триодные структуры, которые прежде всего обеспечивают возможность не только эффективной генерации колебаний, но и эффективного усиления на предельных частотах. Однако технологически такие структуры достаточно сложны, а емкостные эффекты межэлектродных промежутков в значительной степени ограничивают верхний предел генерации и усиления колебаний. Поэтому представляет интерес возможность использования диодных структур с острым катодом для генерации колебаний в субмиллиметровом и дальнем инфракрасном диапазонах. Диапазон частот существования отрицательной динамической проводимости в указанных структурах определяется углом пролета через вакуумный промежуток, который для обеспечения противоположных фаз активной составляющей тока и приложенного напряжения рассматриваемых диодов должен быть равен  $1,5\pi$ . Численные расчеты показывают, что в данных структурах, у которых вакуумный промежуток  $d$  равен  $1 \dots 2 \cdot 10^{-6}$  м, а постоянная составляющая напряжения на аноде  $U_{a0}$  равна  $200 \dots 250$  В,