

УДК 621.396.96

А. В. Зайцев, А. А. Разин

Исследование частотного метода измерения дальности с использованием пачечного ЛЧМ-сигнала

Предложен способ измерения дальности в режиме «Сопровождение на проходе». Исследована зависимость погрешности измерения для разных частот девиации методом математического моделирования в среде *MATLAB*.

Ключевые слова: вторичная обработка, измерение дальности, пачечный линейно-частотно-модулированный сигнал, девиация, *MATLAB*.

Посредством режима «Сопровождение на проходе» (СНП) можно организовать многоцелевое сопровождение в зоне обзора с количеством до 100 целей. Однако в режиме квазинепрерывного излучения зондирующих импульсов возникает неоднозначность по частоте Доплера, когда доплеровский сдвиг частоты отраженного от объекта сигнала превышает частоту повторения импульсов. Также возникает неоднозначность по дальности, связанная с тем, что период повторения зондирующих импульсов меньше реальной задержки принятого сигнала.

В связи с этим для измерения координат происходит одновременное излучение нескольких пачек сигналов с различными значениями частоты повторения в каждой пачке. Путем корреляционной обработки по неоднозначным координатам, измеренным при приеме каждой пачки, вычисляют однозначные координаты целей – дальность и скорость. Данный метод требует 8–10 излучений в одной угловой позиции на разных частотах повторения.

В режиме СНП можно уменьшить время измерения однозначной дальности. Для этого

необходимо провести излучение и обработку сигнала в двух тактах обзора подряд с пачечным линейно-частотно-модулированным сигналом (ЛЧМ-сигналом).

Использование частотной модуляции внутри пачки когерентно излучаемых импульсов позволяет применять доплеровскую обработку отраженных сигналов с измерением частоты Доплера [1]. Изменение девиации от пачки к пачке позволяет измерить зависимость частоты Доплера от значения девиации и дальности до цели. Частотный метод позволяет за короткое время получить однозначное измерение дальности [2–4].

В данной статье методом математического моделирования исследована зависимость точности измерения дальности до цели:

- от полосы пропускания и расстановки доплеровских фильтров;
- девиации частоты;
- шум-фактора (С/Ш) при измерении частоты Доплера.

Структурная схема дальномера представлена на рис. 1.

Передатчик, состоящий из частотного модулятора и генератора высокой частоты, ге-

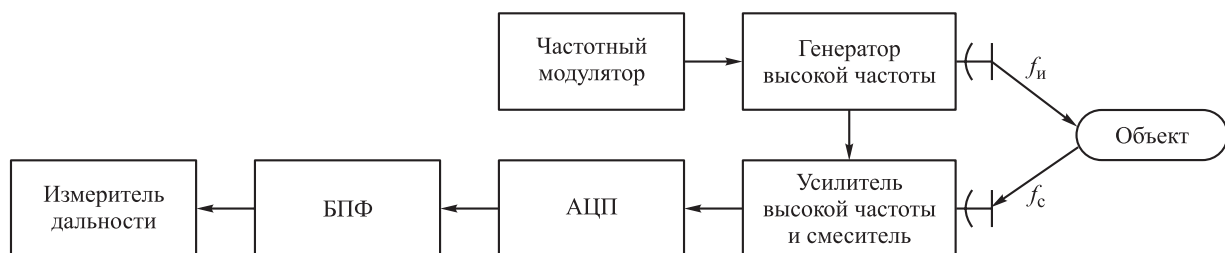


Рис. 1. Структурная схема дальномера:

БПФ – быстрое преобразование Фурье; АЦП – аналого-цифровой преобразователь



нерирует колебания, частота которых меняется по пилообразному периодическому закону. Аналитическая запись ЛЧМ-сигнала имеет вид:

$$S(t) = U_0 \cos(2\pi f_0 t + \pi k t^2), \quad (1)$$

где U_0 – амплитуда;
 f_0 – несущая частота;
 t – время, изменяющееся в диапазоне $0 \dots T_{signal}$ с периодом дискретизации Δt ;
 T_{signal} – длительность тактов обзора;
 k – девиация частоты.

Таким образом, мгновенная частота в сигнале изменяется по линейному закону:

$$f_{и} = f_0 + kt. \quad (2)$$

В случае отраженного сигнала мгновенная частота будет иметь следующий вид:

$$f_c = f_0 + k(t - \tau_D), \quad (3)$$

где $\tau_D = \frac{2D}{c}$ – время задержки;
 D – дальность;
 c – скорость света.

Учитывая эффект Доплера, получим:

$$f_c = f_0 \left(1 + \frac{2V_{radial}}{c} \right) + k(t - \tau_D). \quad (4)$$

Здесь V_{radial} – радиальная скорость цели.

Измерив разность частот излучаемых и принимаемых колебаний, получим значение частоты Доплера:

$$f_D = f_{и} - f_c = k\tau_D + \frac{2f_0 V_{radial}}{c}. \quad (5)$$

При излучении сигнала в двух тактах обзора подряд на одной несущей частоте, но с разными девиациями частот k_1 и k_2 , вычислим разность между значениями частот Доплера:

$$f_{D1} - f_{D2} = k_1 \tau_D - k_2 \tau_D (k_1 - k_2). \quad (6)$$

Затем, измерив значения частот Доплера сигнала в двух тактах обзора, можно получить дальность до цели. Кроме того, точность измерения будет зависеть не от скорости цели, а от разности частот Доплера.

Зная излучаемый сигнал при нулевой дальности, можно вычислить зависимость сдвига автокорреляционной функции от те-

кущей дальности. Для отраженного сигнала с временной задержкой строится взаимно корреляционная функция по излучаемому и принимаемому сигналам [5, 6].

По максимальным значениям функций, зная разницу на частотной оси, можно определить частоты Доплера f_{D1} и f_{D2} для двух значений девиации.

Таким образом, дальность до цели рассчитывается по формулам:

$$\tau_{Dизм} = \left| \frac{f_{D1} - f_{D2}}{k_1 - k_2} \right|; \quad (7)$$

$$D_{изм} = \frac{c\tau_{Dизм}}{2}. \quad (8)$$

Для построения модели использован программный пакет *MATLAB* с расширением *Simulink*. В качестве входного воздействия имитирована траектория движения точечной цели в прямоугольной системе координат. На траектории были выбраны значения дальности до цели $D = 1 \dots 220$ км с шагом 500 м.

На первом этапе моделирования была исследована зависимость среднеквадратического отклонения (СКО) от значения дисперсии шума для следующих значений девиации для первого и второго тактов обзора соответственно:

- $k_1 = 40$ кГц, $k_2 = 60$ кГц;
- $k_1 = 300$ кГц, $k_2 = 500$ кГц;
- $k_1 = 3$ МГц, $k_2 = 5$ МГц.

Для пачки длительностью $T_{signal} = 10$ мс шаг расстановки доплеровских фильтров составляет $1/T_{signal}$, т. е. 100 Гц. Были получены ошибки измерения дальности для разных значений девиации. На каждой позиции цели с шагом 500 м была последовательно проведена серия численных опытов на дальностях в диапазоне $1 \dots 220$ км. Всего было проведено 440 опытов. Статистическая обработка численных опытов дает следующие погрешности измерений дальности:

- для девиаций 40 и 60 кГц – 1500 м;
- для девиаций 300 и 500 кГц – 100 м;
- для девиаций 3 и 5 МГц – 10 м.

Радиолокационным измерениям сопутствует флюктуационная составляющая. В математической модели в качестве источника шума использован генератор случайных чисел



с нормальным распределением. СКО случайного числа σ выбрано в диапазоне с шагом 5 Гц. Для каждого значения дисперсии шума была последовательно проведена серия численных опытов на дальностях в диапазоне 1...220 км с шагом 500 м. Общее количество выборок на каждом значении дисперсии шума составило 4400 численных опытов.

По результатам статистической обработки измерения дальности был проведен расчет СКО. На рис. 2 приведены зависимости СКО измерения дальности от дисперсии шума для разных значений выбранных девиаций частот.

На основании полученных результатов можно сделать вывод, что увеличение девиации частоты приводит к уменьшению погрешности измерения дальности.

На втором этапе моделирования был уменьшен шаг расстановки доплеровского фильтра со 100 до 20 Гц. Были выбраны следующие значения девиации k : 40 кГц для первого и 60 кГц для второго тактов обзора.

Аналогично на каждой позиции цели с шагом 500 м была последовательно проведена серия численных опытов на дальностях в диапазоне 1...220 км. При отсутствии шум-фактора по полученным 440 измерениям дальности погрешность уменьшается с 1500 до 400 м.

СКО случайного числа σ было выбрано в диапазоне 0...100 Гц с шагом 1 Гц. Для каждого значения дисперсии шума была последовательно проведена серия численных опытов на дальностях в диапазоне 1...220 км с шагом 500 м.

На рис. 3 представлены результаты статистической обработки измерения дальности в зависимости от дисперсии шума. Общее количество выборок на каждом значении дисперсии шума составило 4400 численных опытов.

Из рис. 2 и 3 следует, что точность измерения можно повысить, не только увеличив девиацию частоты, но и уменьшив шаг расстановки доплеровских фильтров.

В данной статье проведено численное моделирование измерения дальности частотным методом с использованием пачечного ЛЧМ-сигнала. Установлено, что погрешность измерения дальности до цели можно уменьшить, увеличив девиацию и уменьшив шаг расстановки доплеровских фильтров.

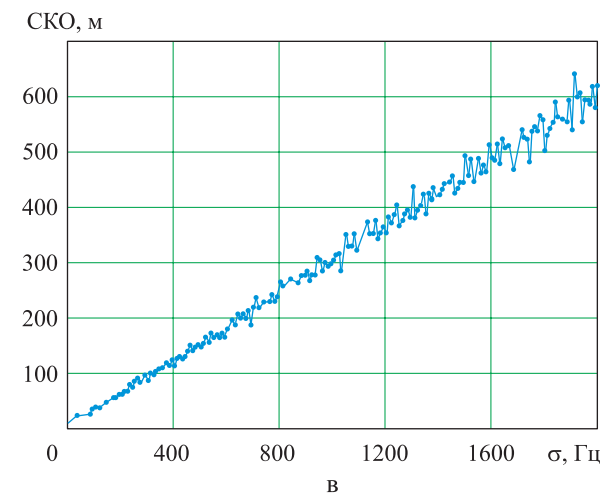
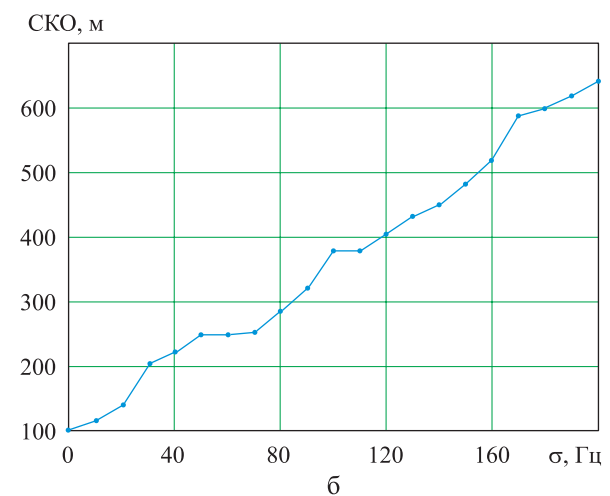
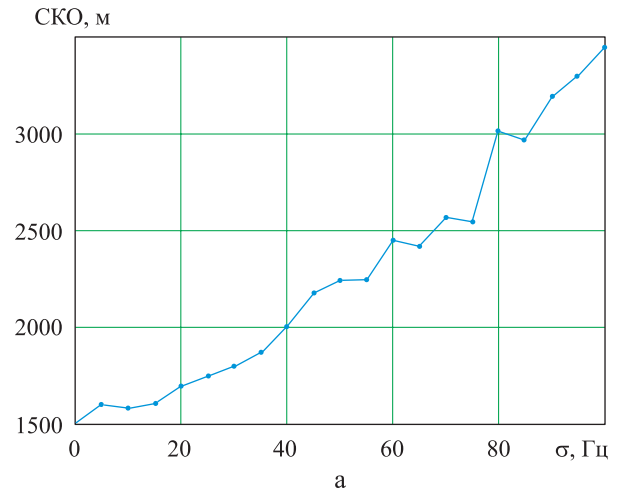


Рис. 2. Зависимости СКО от значения дисперсии шума:
а – девиации 40/60 кГц; б – девиации 300/500 кГц;
в – девиации 3/5 МГц

Для реализации данного метода измерения дальности с учетом возможности технической реализации в РЛС оптимальными значениями девиации оказались частоты порядка 40 и 60 кГц.

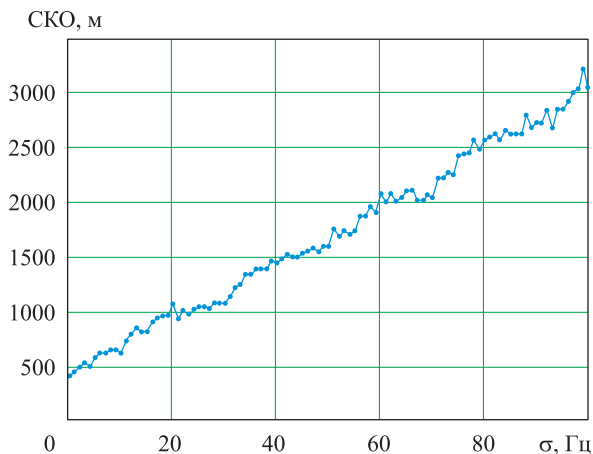


Рис. 3. Зависимость СКО от значения дисперсии шума с уменьшенным шагом расстановки доплеровских фильтров (девиации 40/60 кГц)

При отсутствии шум-фактора погрешность измерения дальности определяется разрешающей способностью по частоте Доплера.

Для частот девиации 40 и 60 кГц при длительности накопления сигнала 10 мс погрешность измерения дальности составляет 1500 м.

Для типовых значений соотношения С/Ш $\geq 15 \dots 20$ дБ в режиме СНП дисперсия доплеровского шума менее 30 Гц, СКО измерения дальности составит не более 1700 м.

При значении девиации, превышающем частоту повторения импульсов в пачке, возникнет неоднозначность по частоте Доплера, что

стоит учитывать при выборе частот.

Полученные этим методом однозначные значения координат целей позволяют выполнить процедуру сопоставления вновь измеренных значений координат с координатами уже сопровождаемых целей в режиме СНП, при этом уменьшается время измерения однозначной дальности. При работе радиолокационных станций в автоматическом режиме это единственный метод организации обзора заданного сектора ответственности с формированием трасс по многим целям.

Список литературы

1. Баскаков С. И. Радиотехнические цепи и сигналы. М.: Высш. школа, 1983. 536 с.
 2. Бакулев П. А. Радиолокационные системы. М.: Радиотехника, 2004. 320 с.
 3. Ширман Я. Д. Теоретические основы радиолокации. М.: Советское радио, 1970. 560 с.
 4. Теоретические основы радиолокации / под ред. В. Е. Дулевича. М.: Советское радио, 1978. 608 с.
 5. Айфичер Э. С., Джервис Б. У. Цифровая обработка сигналов: практический подход. 2-е изд. М.: Издательский дом «Вильямс», 2004. 992 с.
 6. Оппенгейм А., Шафер Р. Цифровая обработка сигналов. 3-е изд. М.: Техносфера, 2012. 1048 с.
- Поступила 01.11.19**

Зайцев Алексей Вячеславович – инженер Акционерного общества «Научно-исследовательский институт приборостроения имени В. В. Тихомирова», г. Жуковский.

Область научных интересов: радиолокационные системы, вторичная обработка радиолокационной информации.

Разин Анатолий Анатольевич – кандидат технических наук, начальник лаборатории Акционерного общества «Научно-исследовательский институт приборостроения имени В. В. Тихомирова», г. Жуковский.

Область научных интересов: радиолокационные системы, вторичная обработка радиолокационной информации.

Study of the frequency range measurement method using train chirp signal

The paper proposes a method for measuring range in the track-while-scan mode. The dependence of the measurement error for different deviation frequencies is studied by the method of mathematical modeling in *MATLAB*.

Keywords: secondary processing, range measurement, train chirp signal, deviation, *MATLAB*.

Zaytsev Aleksey Vyacheslavovich – engineer, V. V. Tikhomirov Scientific Research Institute of Instrument Engineering, Joint Stock Company, Zhukovskiy.

Science research interests: radar systems, secondary processing of radar information.

Razin Anatoliy Anatolievich – Candidate of Engineering Sciences, Head of Laboratory, V. V. Tikhomirov Scientific Research Institute of Instrument Engineering, Joint Stock Company, Zhukovskiy.

Science research interests: radar systems, secondary processing of radar information.