

УДК 621.396.677

Г.В. Ермаков, Д.М. Литовченко, М.Г. Иванец, В.В. Воинов

Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба

## ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ КООРДИНАТ ВОЗДУШНОЙ ЦЕЛИ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ПАЧКИ СВЕРХШИРОКОПОЛОСНЫХ СИГНАЛОВ

*Предложен метод определения оценки точности измерения координат объекта при использовании пачки сверхширокополосных сигналов. Представлен сравнительный анализ ошибок местоопределения для триангуляционной и разностно-дальномерной системы для двух импульсов в пачке. Показано, что при использовании триангуляционной системы и сопоставимых размерах баз ошибка определения координат оказывается существенно (на порядок) больше, чем при использовании разностно-дальномерной системы.*

### *сверхширокополосной сигнал, триангуляционная и разностно-дальномерная системы*

При использовании сверхширокополосных сигналов (СШП) сигналов для распознавания и идентификации малозаметных (малоразмерных) воздушных объектов для решения задачи целераспределения возникает задача определения пространственных координат лоцируемого объекта, точность которых будет зависеть от расположения приемных систем.

**Целью данной статьи** является сравнительный анализ точности определения координат воздушной цели в двухпозиционной и триангуляционной системах.

Точность определения угла прихода сигнала в двухпозиционной системе. Рассмотрим двухпозиционную антенную приемную систему (рис. 1).

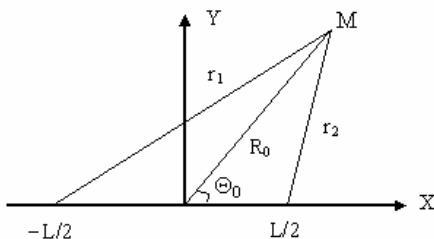


Рис. 1. Схема двухпозиционной приемной позиции

В точке M с полярными координатами, соответствующими дальности и углу места  $(R_0, \Theta_0)$ , расположен наблюдаемый объект, облучаемый

СШП сигналом, а в точках с координатами  $(-L/2, 0)$  и  $(L/2, 0)$  – первый и второй измерители времени прихода сигнала. При  $R_0 \gg L$  разность хода будет составлять

$$\Delta r = r_1 - r_2 = c(t_{01} - t_{02}) = L \cos \Theta_0,$$

где  $t_{01}, t_{02}$  – моменты прихода СШП сигнала на приемники.

Заменяя истинные значения моментов прихода на их оценки  $\hat{t}_1, \hat{t}_2$  для оценки углового положения источника СШП сигнала, получим:

$$\hat{\Theta} = \arccos(\Delta \hat{r}/L), \quad (1)$$

где  $\Delta \hat{r} = c(\hat{t}_1 - \hat{t}_2)$  – оценка разности хода.

В предположении, что оценка разности хода  $\sigma_{\Delta r}^2$  обладает высокой апостериорной точностью и  $\sigma_{\Delta r}^2 \ll L/2$ , дисперсия оценки угла прихода (1)  $\Theta_0$ , будет [1]

$$\sigma_{\hat{\Theta}}^2 = \frac{\sigma_{\Delta r}^2}{L^2 \sin^2 \Theta_0}. \quad (2)$$

Пусть на вход измерителя времени прихода поступает аддитивная смесь гауссовского белого шума со спектральной плотностью  $N_0$  и сигнала  $s(t)$ . Если для оценки времени прихода используются два приемника максимального правдоподобия, то дисперсия разности хода определится как

$$\sigma_{\Delta r}^2 = 2c^2\sigma_t^2,$$

и дисперсия оценки угла прихода сигнала  $s(t)$  [2]:

$$\sigma_{\Theta}^2 = \frac{2c^2\sigma_t^2}{L^2 \sin^2 \Theta_0}. \quad (3)$$

Далее предположим, что сигнал  $s(t)$  является СШП сигналом с параметром  $\tau$ , например, гауссовым видеоимпульсом и может быть представлен в виде

$$s(t) = af(t/\tau_n), \quad (4)$$

где  $a$  – амплитуда сигнала;  $\tau_n$  – длительность импульса.

Подставляя (4) в формулу для дисперсии оценки времени прихода [2] с учетом излучения и рассеяния на цели, получим:

$$\sigma_t^2 = \frac{\tau_n^2}{z^2 \Delta^2}, \quad (5)$$

где  $z^2 = \frac{2a^2\tau_n}{N_0} = \frac{2E}{N_0}$  – отношение сигнал/шум для

одиночного СШП сигнала;  $E = \int_{-\infty}^{\infty} s^2(t) dt$  – энергия

сигнала;  $\Delta^2 = \int_{-\infty}^{\infty} \left[ \frac{df(x)}{dx} \right]^2 dx$  – безразмерный параметр, который зависит от формы сигнала.

Подставляя (5) в (3) и учитывая, что  $\sigma_{\Delta r}^2 = 2c^2\sigma_t^2$ , получим дисперсию оценки разности хода при приеме одиночного СШП сигнала [3]:

$$\sigma_{\Delta r}^2 = \frac{2(c\tau_n)^2}{z^2 \Delta^2} \quad (6)$$

и дисперсию оценки угла прихода:

$$\sigma_{\Theta}^2 = 2 \left( \frac{c\tau_n}{L} \right)^2 \frac{1}{z^2 \Delta^2 \sin^2 \Theta_0}. \quad (7)$$

Известно [4], что в случае узкополосного сигнала точность оценки направления угла прихода зависит от отношения длины волны к базе измерителя – чем это отношение меньше, тем выше точность оценки. В случае использования СШП сигналов, для оценки угла прихода используется другая характеристика, то есть чем меньше отношение пространственной длительности сигнала к базе измерителя (7), тем выше точность оценки направления угла прихода.

Большая пиковая мощность при малой длительности одиночного СШП сигнала приводят к тому, что соотношение сигнал/шум при обработке оказывается недостаточным для обеспечения высокой точности оценки времени прихода, поэтому в большинстве практических приложений целесообразно использовать пачку СШП сигналов вида

$$s_N(t) = \sum_{i=1}^N s(t - iT), \quad (8)$$

где  $T$  – период повторения, во много раз превышающий длительность СШП сигнала.

При обработке последовательности (8) из  $N$  сигналов с известным периодом повторения  $T$  дисперсия оценки максимального правдоподобия времени прихода уменьшается в  $N$  раз по сравнению с дисперсией оценки времени прихода одиночного СШП сигнала [2]. В силу этого, при приеме пачки СШП сигналов уменьшатся также дисперсия оценок разности хода и угла прихода.

Кроме времени прихода у сигналов вида (4) и их последовательности (8) могут быть неизвестны некоторые другие параметры, в оценке которых нет необходимости при определении угла прихода СШП сигнала. В случае, если неизвестен период повторения  $T$ , то в соответствии с принципом максимального правдоподобия для получения оценки времени прихода последовательности (8) надо значение неизвестного параметра заменить на его максимально правдоподобную оценку. Последнее равносильно совместному оцениванию времени прихода и периода повторения с последующим использованием только оценки времени прихода. Следовательно, незнание периода повторения может вызвать определенные трудности при аппаратной реализации алгоритма оценки времени прихода.

Подставляя (5) в выражение для дисперсии оценки максимального правдоподобия времени прихода сигнала при обработке последовательности  $N$  СШП сигналов  $\sigma_N^2(\Theta_0)$ , а затем полученную зависимость в формулу (6) и (7), найдем дисперсии оценок разности хода и угла прихода соответственно:

$$\sigma_{\Delta r(N)}^2 = 2c^2\sigma_N^2(\Theta_0) = \frac{2c^2\sigma_t^2}{N} \left( 1 + 3 \frac{N-1}{N+1} \right) = \frac{2(c\tau_n)^2}{z^2 \Delta^2 N} \left( 1 + 3 \frac{N-1}{N+1} \right); \quad (9)$$

$$\sigma_{\Theta(N)}^2 = \frac{2 \left( \frac{c\tau_n}{L} \right)^2 \left( 1 + 3 \frac{N-1}{N+1} \right)}{N \Delta^2 z^2 \sin^2 \Theta_0}. \quad (10)$$

Из выражений (9), (10) можно оценить проигрыш в точности оценки угла прихода последовательности (8) вследствие незнания периода повторения:

$$\psi = 1 + 3 \frac{N-1}{N+1}. \quad (11)$$

В соответствии с (11), проигрыш в точности угла прихода колеблется от  $\psi = 2$  при  $N = 2$  до  $\psi = 4$  при  $N \gg 1$ . Таким образом, при последовательности в 10 – 15 СШП сигналов, незнание периода повторения приводит к увеличению дисперсии оценки угла прихода примерно 4 раза.

Точность определения угла прихода сигнала в триангуляционной системе. Рассмотренная выше двухпозиционная система измерения угла прихода СШП сигнала может быть использована для построения триангуляционной системы с базой  $d$ .

Если по-прежнему выполняется условие  $d^2 \ll R_0^2$ , то среднеквадратическую ошибку  $\sigma_{Tr}$  местоопределения лоцируемого воздушного объекта при зондировании СШП сигналом, можно выразить через дисперсию  $\sigma_{\Theta}^2$  оценки угла прихода двухпозиционными системами. При обработке одиночного импульса получим:

$$\sigma_{Tr} = \frac{2c\tau_{и}R_0^2}{\Delta z \sin^2 \Theta_0 L d}. \quad (12)$$

Из (12) следует, что среднеквадратическая ошибка местоопределения убывает с уменьшением пространственной длительности СШП сигнала и с увеличением базы  $d$  триангуляционной системы и базы  $L$  каждой из двухпозиционных систем измерения угла прихода сигнала.

Если обрабатывается последовательность СШП сигналов с известным периодом повторения  $T$ , то среднеквадратическая ошибка местоопределения

$$\sigma_{Tr(N)} = \frac{\sigma_{Tr}}{\sqrt{N}},$$

а для последовательности с неизвестным периодом повторения:

$$\sigma_{Tr(N)} = \frac{2c\tau_{и}R_0^2}{\sqrt{N}\Delta z \sin^2 \Theta_0 L d} \sqrt{\left(1 + 3 \frac{N-1}{N+1}\right)}. \quad (13)$$

Сравнивая ошибку местоопределения для последовательности с известным и неизвестным периодами повторения последовательности СШП сигналов, видно что в последнем случае ошибка увеличивается в  $\sqrt{\left(1 + 3 \frac{N-1}{N+1}\right)}$  раз.

Одним из преимуществ рассмотренной триангуляционной системы определения местоположения источника СШП сигнала являются сравнительно низкие требования к синхронизации обработки сигналов в точках расположения двухпозиционных измерителей угла прихода. Однако для реализации триангуляционной системы с помощью двухпозиционных систем определения угла прихода необходимо использовать четыре измерителя времени прихода СШП сигналов или их последовательности. Ограничиться применением трех измерителей времени прихода с соответствующей синхронизацией можно, если для определения положения источника переотраженного сигнала использовать разностно-дальномерную систему с равными взаимно перпендикулярными базами  $d$ .

Среднеквадратичную ошибку  $\sigma_{Gr}$  местоопределения источника сигнала можно выразить через дисперсию  $\sigma_{\Delta r}^2$  оценки разности хода в разностно-дальномерной системе. Для одиночного СШП сигнала с учетом (6) получим [3]:

$$\sigma_{Gr} = \frac{4c\tau_{и}R_0^2}{d^2 \Delta z \sqrt{1 + \sin^2 \Theta_0}}. \quad (14)$$

Если обрабатывается последовательность из  $N$  сигналов с известным периодом повторения  $T$ , то среднеквадратичная ошибка местоопределения источника уменьшается в  $\sqrt{N}$  раз. При обработке последовательности с неизвестным периодом повторения получим

$$\sigma_{Gr(N)} = \frac{4c\tau_{и}R_0^2}{d^2 \Delta z \sqrt{1 + \sin^2 \Theta_0}} \sqrt{\left(1 + 3 \frac{N-1}{N+1}\right)}. \quad (15)$$

Также как и при использовании триангуляционной системы, незнание периода повторения последовательности СШП сигналов приводит к увеличению среднеквадратической ошибки местоопределения в  $\sqrt{1 + 3((N-1)/(N+1))}$  раз.

На рис. 2 представлен сравнительный анализ ошибок местоопределения для триангуляционной и разностно-дальномерной системы для двух импульсов в пачке. База двухпозиционной системы составляет  $L = 0,5$  м.

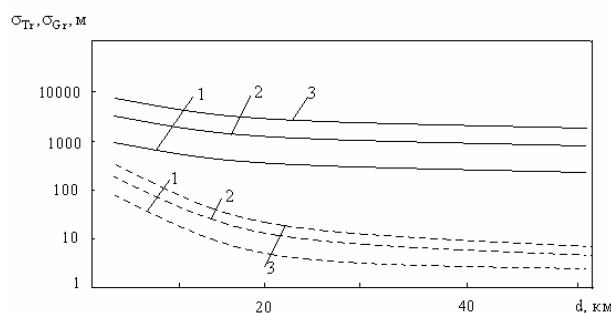


Рис. 2. Ошибки местоопределения для триангуляционной и разностно-дальномерной системы

Штриховые линии характеризуют ошибки разностно-дальномерной системы, а сплошные – триангуляционной. Цифрами обозначены соответственно длительности зондирующих СШП сигналов (1 – 1 нс, 2 – 2 нс, 3 – 3 нс). Из анализа полученных результатов видно, что при использовании триангуляционной системы и сопоставимых размерах баз  $d$  ошибка определения координат оказывается существенно (на порядок) больше, чем при использовании разностно-дальномерной системы.

### Список литературы

1. Сосулин Ю.Г. Теоретические основы радиолокации и радионавигации. – М.: Радио и связь, 1992. – 256 с.
2. Куликов Е.И., Трифонов А.П. Оценка параметров сигнала на фоне помех. – М.: Сов. радио, 1978. – 317 с.
3. Радзиевский В.Г., Трифонов П.А. Эффективность определения местоположения источника сверхширокополосного сигнала // Радиотехника. – 2000. – № 6. – С. 39-42.
4. Кондратьев В.С., Котов А.В., Марков Л.Н. Многопозиционные радиотехнические системы. – М.: Радио и связь, 1986. – 249 с.

Поступила в редколлегию 5.11.2007

Рецензент: д-р техн. наук, проф. И.И. Обод, Национальный технический университет «ХПИ», Харьков.