

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).

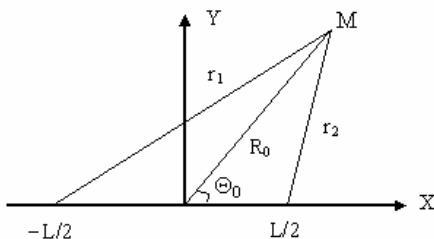


Рис. 1. Схема двухпозиционной приемной позиции

В точке M с полярными координатами, соответствующими дальности и углу места (R_0, Θ_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) Θ_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 τ , например, гауссовым видеоимпульсом и может быть представлен в виде

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

где a – амплитуда сигнала; τ_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 σ_{Tr} местоопределения лоцируемого воздушного объекта при зондировании СШП сигналом, можно выразить через дисперсию σ_{Θ}^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 σ_{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.

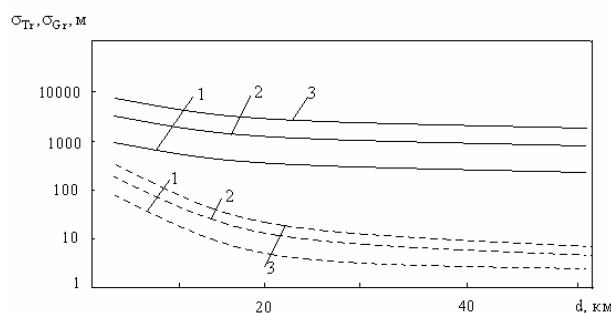


Рис. 2. Ошибки местоопределения для триангуляционной и разностно-дальномерной системы

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., Трифионов А.П. Оценка параметров сигнала на фоне помех. – М.: Сов. радио, 1978. – 317 с.
3. Радзиевский В.Г., Трифионов 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.