

ОЦЕНКА ОШИБОК ОПРЕДЕЛЕНИЯ УГЛОВОЙ СКОРОСТИ ВРАЩЕНИЯ ЦЕЛИ В РЛС С РАЗНЕСЕННЫМ ПРИЕМОМ

Е.Л. Казаков, А.Е. Казаков, В.Б. Бзот

(Объединенный научно-исследовательский институт ВС Украины, Харьков)

Получено аналитическое выражение, позволяющее оценить относительную ошибку определения угловой скорости вращения цели при проведении корреляционной обработки огибающих амплитуд отраженных сигналов, принимаемых совмещенной РЛС и вынесенным приемным пунктом. Рассмотрено влияние различных факторов на точность определения данной скорости вращения.

угловая скорость, вращение цели, разнесенный прием

Постановка проблемы и анализ публикаций. Как показывают проведенные исследования [1, 2, 3, 5], одним из признаков, которые могут быть использованы для распознавания радиолокационных целей, является относительная скорость вращения данной цели. Этот признак может быть определен различными методами. Например, при наблюдении за космическими объектами по реализации амплитуд отраженных сигналов [1]. Данный метод требует большого времени наблюдения. Также возможно определение относительной угловой скорости вращения цели (УСВЦ) при использовании измеряемых элементов поляризационной матрицы рассеяния [4]. Однако, РЛС, которые бы производили измерение этих элементов в настоящее время на Украине нет. Одним из методов получения информации об УСВЦ является метод совместной корреляционной обработки огибающих амплитуд отраженных сигналов, принимаемых в совмещенном с РЛС и вынесенном пункте [3, 5]. Данный метод значительно проще в реализации по сравнению с перечисленными выше. Однако необходимо оценить ошибки определения УСВЦ, получаемой в РЛС с разнесенным приемом, чтобы в дальнейшем разработать предложения по их уменьшению. Эти оценки в литературе не приведены. Поэтому проведение оценок ошибок определения УСВЦ по информации, получаемой в РЛС с разнесенным приемом, является актуальной научно-технической задачей.

Целью данной статьи является получение аналитических выражений, позволяющих оценить зависимости относительных ошибок определения УСВЦ по данным РЛС с разнесенным приемом от различных факторов.

Изложение основного материала. Как показано в [5], значение УСВЦ при проведении корреляционной обработки огибающих амплитуд отраженных от цели сигналов, принимаемых в РЛС с разнесенным приемом, может быть определено в соответствии с выражением

$$\hat{\Omega} = \frac{\hat{\beta}}{\hat{\tau}_{\max}}, \quad (1)$$

где $\hat{\beta}$ – оценка угла разноса РЛС и вынесенного приемного пункта; $\hat{\tau}_{\max}$ – оценка временного положения максимума взаимной корреляционной функции (ВКФ) огибающих амплитуд сигналов, принимаемых в РЛС с разнесенным приемом.

Очевидно, что при оценке УСВЦ в соответствии с выражением (1) суммарная ошибка будет зависеть от ошибок определения угла разноса и временного смещения максимума ВКФ.

Найдем выражение, связывающее эти ошибки. Приращение угловой скорости вращения можно найти, используя выражение, через частные производные по β и τ и приращения этих величин $\Delta\beta$ и $\Delta\tau$

$$\Delta\Omega = \left. \frac{d\Omega}{d\beta} \right|_{\substack{\beta=\hat{\beta} \\ \tau=\hat{\tau}}} \cdot \Delta\beta + \left. \frac{d\Omega}{d\tau} \right|_{\substack{\tau=\hat{\tau} \\ \beta=\hat{\beta}}} \cdot \Delta\tau. \quad (2)$$

В этом случае дисперсию σ_{Ω}^2 можно найти как математическое ожидание от квадрата приращения

$$\sigma_{\Omega}^2 = M(\Delta\Omega^2) = M \left\{ \left[\left. \frac{d\Omega}{d\beta} \right|_{\substack{\beta=\hat{\beta} \\ \tau=\hat{\tau}}} \cdot \Delta\beta + \left. \frac{d\Omega}{d\tau} \right|_{\substack{\tau=\hat{\tau} \\ \beta=\hat{\beta}}} \cdot \Delta\tau \right]^2 \right\}. \quad (3)$$

Если ошибки измерения угла разноса и смещений максимума ВКФ независимы, то с учетом (1) выражение (3) преобразуется к виду

$$\sigma_{\Omega}^2 = \frac{1}{2\hat{\tau}^2} \cdot \sigma_{\beta}^2 + \frac{\hat{\beta}^2}{4\hat{\tau}^4} \cdot \sigma_{\tau}^2. \quad (4)$$

Так как угол разноса может быть найден, например, с использованием измерений угловых координат в каждой из приемных позиций, ошибка которых малы, то можно полагать, что ошибки оценки УСВЦ в основном определяются ошибками определения смещения максимумов ВКФ. Для удобства будем использовать относительные ошибки σ_{Ω}^2 , определяемые в соответствии с выражением

$$\delta_{\Omega}^2 = \frac{\sigma_{\Omega}^2}{\Omega^2} = \frac{\hat{\beta}^2}{4\Omega^2 \hat{\tau}^4} \sigma_{\tau}^2. \quad (5)$$

Поскольку в дальнейшем для нахождения σ_{τ}^2 будет использоваться аналитическое выражение ВКФ, то удобно вместо σ_{τ}^2 использовать $\sigma_{\Omega\tau}^2$, так как в выражении, описывающем ВКФ, Ω является своеобразным масштабирующим множителем для τ . С учетом того, что $\sigma_{\Omega\tau} = \sigma\Omega$, выражение (5) имеет вид

$$\delta_{\Omega}^2 = \frac{\hat{\beta}^2}{4\hat{\tau}^4\Omega^4} \cdot \sigma_{\Omega\tau}^2. \quad (6)$$

Так как $\hat{\tau}\Omega = \hat{\beta}/2$, то выражение (6) преобразуется к виду

$$\delta_{\Omega}^2 = \frac{4}{\hat{\beta}^2} \cdot \sigma_{\Omega\tau}^2. \quad (7)$$

Таким образом, для оценки относительной ошибки УСВЦ необходимо оценить ошибки оценки смещения максимума ВКФ. Они могут быть обусловлены различными причинами. Например, отклонение максимума ВКФ относительно истинного значения может происходить из-за различной дальности до цели от обоих РЛС. Однако это смещение относительно истинного значения будет меньше 1%, поскольку для УСВЦ, составляющей единицы град/сек и углов разноса более 5° максимум ВКФ смещается на сотни миллисекунд, а разность во временах приема сигналов различных РЛС не превышает единицы миллисекунд. Поэтому эту ошибку в дальнейшем можно не учитывать.

Кроме того, поскольку временное положение максимума ВКФ определяется по положению ее максимума, то будут возникать ошибки, обусловленные наличием шумов на выходе вычислителя ВКФ. Величины этих ошибок будут определяться отношением сигнал/шум на выходе вычислителя ВКФ и величиной второй производной от выражения ВКФ в максимуме в соответствии с выражением [6]

$$\sigma_{\Omega\tau}^2 = \frac{1}{q_B^2 R''(\Omega\tau)}, \quad (8)$$

где q_B – отношение сигнал/шум на выходе вычислителя ВКФ; $R''(\Omega\tau)$ – значение второй производной ВКФ в максимуме.

Для оценки $\sigma_{\Omega\tau}^2$ будем использовать аппроксимацию ВКФ экспоненциальной функцией вида

$$R(\Omega\tau) = \frac{1}{N} + \frac{N-1}{N} \exp\left\{-\left(\frac{\beta}{2} - \Omega\tau\right)^2 / \Delta_{\beta}^2\right\}, \quad (9)$$

где Δ_β – средняя ширина лепестка диаграммы обратного вторичного рассеяния для данного класса целей.

Вторая производная от выражения (9) будет равна

$$R''(\Omega\tau) = \frac{2(N-1)}{N\Delta_\beta^2} \exp\left\{-\frac{(\beta/2 - \Omega\tau)^2}{\Delta_\beta^2}\right\} - \frac{4(\beta/2 - \Omega\tau)^2(N-1)}{N\Delta_\beta^4} \exp\left\{-\frac{(\beta/2 - \Omega\tau)^2}{\Delta_\beta^2}\right\}. \quad (10)$$

Подставляя в выражение (10) $\Omega\hat{\tau} = \beta/2$, получим:

$$R''(\Omega\tau) = \frac{2(N-1)}{N\Delta_\beta^2}. \quad (11)$$

Выражение (11) получено при использовании ВКФ интенсивностей сигналов, принимаемой РЛС с разнесенным приемом без учета отношения сигнал/шум в приемных трактах. Данную зависимость можно получить, если предположить, что на вход вычислителя поступают сигналы вида

$$\begin{aligned} V_1(t) &= S_1(t) + W_1(t); \\ V_2(t) &= S_2(t) + W_2(t), \end{aligned} \quad (12)$$

где $V_1(t)$ и $V_2(t)$ – сигналы, поступающие соответственно на первый второй входы вычислителя ВКФ; $S_1(t)$ и $S_2(t)$ – интенсивности сигналов, принимаемых соответствующими РЛС без учета шумов в приемных трактах; $W_1(t)$ и $W_2(t)$ – шумовые составляющие в соответствующих приемных трактах.

Нормированную ВКФ можно вычислить в соответствии с выражением

$$\begin{aligned} R_{с+ш}(\tau) &= \frac{\overline{V_1(t) \cdot V_2(t-\tau)}}{\sqrt{\overline{V_1^2(t)} \cdot \overline{V_2^2(t)}}} = \\ &= \frac{S_1(t)S_2(t-\tau) + S_1(t)W_2(t-\tau) + S_2(t-\tau)W_1(t) + W_1(t)W_2(t-\tau)}{\left(\overline{S_1^2(t)} + 2\overline{S_1(t)W_1(t)} + \overline{W_1^2(t)}\right)^{1/2} \left(\overline{S_2^2(t)} + 2\overline{S_2(t)W_2(t)} + \overline{W_2^2(t)}\right)^{1/2}}, \end{aligned} \quad (13)$$

где $R_{с+ш}(t)$ – выражение, описывающее ВКФ с учетом шумов приемных трактов; $\overline{\dots}$ – знак усреднения по времени.

Если предположить, что шумы по времени на выходах приемных трактов некоррелированы между собой, а также не коррелированы с флуктуациями интенсивностей сигналов, отраженных от цели, то выражение (13) преобразуется к виду

$$\begin{aligned}
R_{c+\text{ш}}(t) &= \frac{S_1(t)S_2(t-\tau)}{\left(S_1^2(t) + W_1^2(t)\right)^{1/2} \left(S_2^2(t) + W_2^2(t)\right)^{1/2}} = \\
&= \frac{S_1(t)S_2(t-\tau)}{\left(S_1^2(t)S_2^2(t)\right)^{1/2} \left(1 + \frac{1}{q_1^2}\right)^{1/2} \left(1 + \frac{1}{q_2^2}\right)^{1/2}} = \frac{R_c(\tau)}{\left(1 + \frac{1}{q_1^2}\right)^{1/2} \left(1 + \frac{1}{q_2^2}\right)^{1/2}}, \quad (14)
\end{aligned}$$

где $R_c(\tau)$ – ВКФ, полученная без учета шумов приемных устройств; q_1^2 и q_2^2 – отношения сигнал/шум на выходе приемных устройств.

Используя (8), (11), (14), получим выражение для оценки ошибок определения УСВЦ в виде

$$\sigma_{\Omega\tau}^2 = \frac{N\Delta_\beta^2}{2(N-1)q_B^2} \left(1 + \frac{1}{q_1^2}\right)^{1/2} \left(1 + \frac{1}{q_2^2}\right)^{1/2}. \quad (15)$$

Для большей наглядности можно перейти от средней ширины лесточки диаграммы обратного вторичного рассеяния к среднему поперечному размеру цели y и длине волны РЛС λ , используя следующее приближенное равенство: $\Delta_\beta \approx 57\lambda/y$. Подставив выражение (15), с учетом сделанной замены, в выражение (7), получим

$$\delta_\Omega = \frac{57\lambda}{\hat{\beta}y} \left[\frac{2N \left(1 + \frac{1}{q_1^2}\right)^{1/2} \left(1 + \frac{1}{q_2^2}\right)^{1/2}}{q_B^2(N-1)} \right]. \quad (16)$$

Из выражения (16) видно, что относительная среднеквадратическая ошибка определения УСВЦ зависит от отношения сигнал/шум как в приемном канале, так и на выходе вычислителя ВКФ, от геометрических характеристик цели (y , N), от длины волны РЛС λ , а также от угла разноса между приемо-передающей и выносной приемной позицией. По выражению (16) могут быть получены зависимости относительной среднеквадратической ошибки определения УСВЦ от данных составляющих.

Из анализа выражения (16) следует, что при заданной величине базы для целей, находящихся на меньших дальностях (при больших углах разноса), ошибки будут меньше, чем для целей, находящихся на больших дальностях. Это обусловлено тем, что при уменьшении дальности будет происходить увеличение абсолютного смещения максимума ВКФ при одинаковых скоростях вращения целей. При отклонении цели от нормали к базе также будут изменяться углы разноса для целей, нахо-

дящихся на одинаковых дальностях, что в свою очередь приведет к изменению относительных среднеквадратических ошибок определения УСВЦ. Как показывают проведенные расчеты, данные ошибки слабо изменяются при небольших отклонениях от нормали (менее 30°) и резко возрастают при больших (более 60°).

Из проведенного анализа, казалось бы, следует вывод, что для того, чтобы ошибки свести к минимуму, необходимо добиваться увеличения угла разноса. Однако, это справедливо до определенного предела, потому, что с увеличением угла разноса, уменьшается корреляция флуктуаций интенсивностей сигналов, принимаемых в совмещенном и вынесенном пунктах.

Выводы. Таким образом, полученное аналитическое выражение позволяет оценить зависимость относительной ошибки определения УСВЦ от ее геометрических характеристик, угла разноса приемных каналов РЛС, отношения сигнал/шум на выходе этих каналов на выходе вычислителя ВКФ, а также от длины волны РЛС.

ЛИТЕРАТУРА

1. Казаков Е.Л. Радиолокационное распознавание космических объектов по поляризационным признакам. – Одесса: Одесский институт управления и менеджмента, 1999. – 130 с.
2. Казаков Е.Л., Бзот В.Б. Корреляционная обработка информации о радиолокационной цели, наблюдаемой системой разнесенных РЛС // Збірник наукових праць ХВУ. – Х.: ХВУ, 2001. – Вип. 4 (34). – С. 83-85.
3. Казаков Е.Л., Бзот В.Б. Распознавание радиолокационных целей по некогерентной информации при использовании простых сигналов // Прикладная радиоэлектроника. – Х.: Академия наук прикладной радиоэлектроники. – Т. 1. – № 1. – 2002. – С. 85-88.
4. Казаков Е.Л., Казаков А.Е. Способы определения ориентации осесимметрической цели при измерении поляризационной матрицы рассеяния в нескольких пунктах наблюдения. // Системи обробки інформації. – Х.: ХВУ, 2003. – Вип. 2. – С. 174-178.
5. Казаков Е.Л., Бзот В.Б., Казаков А.Е., Павлов В.Л. Радиолокационные признаки распознавания при многопозиционной локации / Под ред. Е.Л. Казаков. – Х.: А.С.Е. СПД ФО Сторожук А.П., 2005. – 188 с.
6. Ширман Я.Д., Манжос В.Н. Теория и техника обработки радиолокационной информации на фоне помех. – М.: Радио и связь, 1981. – 416 с.

Поступила 6.03.2006

Рецензент: доктор технических наук, старший научный сотрудник В.И. Антюфеев, Объединенный научно-исследовательский институт ВС Украины, Харьков.