УДК 621. 396 . 96 : 621. 396 . 26

СОВМЕСТНАЯ ОЦЕНКА ПРОСТРАНСТВЕННЫХ КООРДИНАТ ДВУХБАЗОВЫХ ПАССИВНЫХ СИСТЕМ

к.т.н. Ю.А. Сиротин
(представил д.т.н., проф. О.И. Сухаревский)

Для двухбазовых систем с произвольным углом раствора баз и измерением пеленга на центральном пункте предлагается алгоритм совместной оценки сферических координат по измерениям азимута, угла места и разности хода сигнала.

Известно [1], что точность оценки дальности однобазовой угломестно - разностно - дальномерной (УРД) системы существенно зависит от положения воздушного радиоизлучающего объекта (цели) и не всегда обеспечивает требуемые ТТХ. Требуемые характеристики можно обеспечить применением многобазовых систем с различной "геометрией", обусловленной зоной ответственности. Секторная зона ответственности и возможная мобильность таких систем определяют необходимость рассмотрения двухбазовых систем с произвольным углом раствора между базами.

Особенностью рассматриваемых УРД систем является то, что на каждой базе, входящей в систему, независимо измеряются три первичные координаты: разность хода сигнала ($\boldsymbol{\tau}$-координата) и пеленг $\vec{\mathbf{v}} = (\boldsymbol{\beta}, \boldsymbol{\varepsilon})$ относительно центрального пункта приема (ЦПП) в некоторой сферической системе координат (ССК). По каждым таким трем измерениям $(\boldsymbol{\tau}, \boldsymbol{\beta}, \boldsymbol{\varepsilon})$ каждой базы можно получить оценку дальности $\mathbf{R}$. Однако точность такой оценки зависит от угла между линией пеленга цели и линией базы и для заданного направления различна для разных баз.

Дальнейшее комплексирование, таким образом, полученных разноточных оценок дальности вызывает определенные трудности [2] как теоретического плана, так и реализационного характера, связанные с введением весовых коэффициентов, и приводит к потере качества. Избежать комплексирования и построить совместную оценку пространственных координат возможно, если для каждой двухбазовой системы вводить свою пространственную систему координат. Вычисления в новой системе координат проводятся при приоритетном использовании из шести первичных измерений $(\hat{\boldsymbol{\tau}}_1, \hat{\boldsymbol{\beta}}_1, \hat{\boldsymbol{\varepsilon}}_1,)$ и $(\hat{\boldsymbol{\tau}}_2, \hat{\boldsymbol{\beta}}_2, \hat{\boldsymbol{\varepsilon}}_2,)$ высокоточных и равноточных измерений разности хода сигнала (РХС). Полученные оценки обратным преобразованием переводятся в оценки в исходной системе координат.

Обозначим $\vec{\mathbf{b}}_1 = \mathbf{b}_1 \vec{\mathbf{b}}_1^0$ и $\vec{\mathbf{b}}_2 = \mathbf{b}_2 \vec{\mathbf{b}}_2^0$ - радиус-вектора баз, где $\mathbf{b}_1$ и $\mathbf{b}_2$ -

длины, а $\vec{\mathbf{b}}_1^0$ и $\vec{\mathbf{b}}_2^0$ - орты первой и второй базы. Нумерация баз выбрана против часовой стрелки. Тогда $\vec{\mathbf{b}}_1^0 \cdot \vec{\mathbf{b}}_2^0 = \cos\lambda$ скалярное произведение ортов баз, а λ - угол раствора двухбазовой системы. В дальнейшем будем считать, что оба выносных пункта (ВП1 и ВП2) и ЦПП не лежат на одной прямой **($\cos\lambda \neq -1$)**.

Пусть $\vec{\mathbf{R}} = (\mathbf{R}, \beta, \varepsilon)$ радиус-вектор произвольной точки пространства (цели в зоне ответственности) с соответствующими сферическими координатами. Обозначим $\vec{\mathbf{R}} \cdot \vec{\mathbf{b}}_k = \mathbf{R} \cdot \mathbf{b}_k \cdot \cos\theta_k$ - скалярное произведение радиус-вектора $\vec{\mathbf{R}}$ и радиус - вектора **к** - й базы, θ_k - угол между линией пеленга на цель и линией базы.

Введем пространственную декартову систему координат (ДСК), согласованную с геометрией двухбазовой системы. Начало координат совместим с ЦПП. Ось абсцисс направим по биссектрисе угла раствора между базами, оси ординат и аппликат выберем так, чтобы полученная ДСК была правой. Ортонормированный базис $\{\vec{e}_1, \vec{e}_2, \vec{e}_3\}$ новой ДСК связан с ортами баз следующими выражениями:

$$\vec{e}_1 = \frac{1}{2\cos\lambda/2}\left(\vec{b}_1^0 + \vec{b}_2^0\right); \quad \vec{e}_2 = \frac{1}{2\sin\lambda/2}\left(\vec{b}_2^0 - \vec{b}_1^0\right);$$

$$\vec{e}_3 = \vec{e}_1 \times \vec{e}_2 = \frac{1}{\sin\lambda}\left(\vec{b}_1^0 \times \vec{b}_2^0\right).$$

В силу ортогональности ортов $\{\vec{e}_1, \vec{e}_2, \vec{e}_3\}$ в новой ДСК для координат радиус-вектора $\vec{\mathbf{R}} = \tilde{x}\,\vec{e}_1 + \tilde{y}\,\vec{e}_2 + \tilde{z}\,\vec{e}_3$ имеем:

$$\tilde{x} = \vec{R} \cdot \vec{e}_1 = \frac{R}{2\cos\lambda/2}\left(\cos\theta_1 + \cos\theta_2\right);$$

$$\tilde{y} = \vec{R} \cdot \vec{e}_2 = \frac{R}{2\sin\lambda/2}\left(\cos\theta_2 - \cos\theta_1\right);$$

$$\tilde{z} = \vec{R} \cdot \vec{e}_3 = R\sqrt{1 - \frac{\cos^2\vartheta_1 + \cos^2\vartheta_2 - 2\cos\vartheta_1\cos\vartheta_2\cos\lambda}{\sin^2\lambda}}\ .$$

Если ввести новую сферическую систему координат $< \mathbf{O}, \{\tilde{\mathbf{R}}, \tilde{\beta}, \tilde{\varepsilon}\} >$, совместив ее полюс **0** с ЦПП, а полярную ось с введенным ранее ортом $\vec{e}_1$, то для азимута $\tilde{\beta}$ и угла места $\tilde{\varepsilon}$ цели в новой сферической системе координат:

$$\tilde{\beta} = \mathrm{arctg}\left[\mathrm{tg}(\lambda/2)\frac{\cos\theta_2 - \cos\theta_1}{\cos\theta_2 + \cos\theta_1}\right], \qquad (1)$$

$$\tilde{\varepsilon} = \mathbf{arctg}\sqrt{\frac{\sin^2\lambda - \left(\cos^2\theta_1 + \cos^2\theta_2 - 2\cos\theta_1\cos\theta_2\cos\lambda\right)}{\cos^2\theta_1 + \cos^2\theta_2 - 2\cos\theta_1\cos\theta_2\cos\lambda}}\,. \tag{2}$$

Ясно, что в обеих системах координат дальность до цели $\mathbf{R} = \sqrt{\mathbf{x}^2 + \mathbf{y}^2 + \mathbf{z}^2}$ и $\tilde{\mathbf{R}} = \sqrt{\tilde{\mathbf{x}}^2 + \tilde{\mathbf{y}}^2 + \tilde{\mathbf{z}}^2}$ будет одинаковой. Пеленг $(\tilde{\beta}, \tilde{\varepsilon})$ цели в новой сферической системе координат полностью определяется двумя параметрами $\cos\theta_1$ и $\cos\theta_2$. Получим зависимости между $\cos\theta_1$, $\cos\theta_2$ и измеряемыми первичными координатами τ_1 и τ_2. Будем считать, что РХС прохождения пути от цели с радиус-вектором $\vec{\mathbf{R}}$ до ЦПП и до $\mathbf{к}$ - го ВПП определена как разность соответствующих расстояний

$$\tau_k = \mathbf{R} - \mathbf{R}_k = \mathbf{R} - \sqrt{\mathbf{R}^2 + \mathbf{b}_k^2 - 2\mathbf{R}\mathbf{b}_k\cos\theta_k}\,. \tag{3}$$

Соотношение (3) дает систему уравнений

$$\begin{cases} \mathbf{b}_1\cos\theta_1 = \tau_1^2 - \mathbf{b}_1^2 - 2\tau_1\mathbf{R}\,; \\ \mathbf{b}_2\cos\theta_2 = \tau_2^2 - \mathbf{b}_2^2 - 2\tau_2\mathbf{R}. \end{cases} \tag{4}$$

Если известны $\cos\theta_1$ и $\cos\theta_2$, то из (4) можно получить выражение для дальности

$$\mathbf{R} = \frac{1}{2(\tau_1 + \tau_2)}\sum_1^2\left(\tau_k^2 - \mathbf{b}_k^2 - \mathbf{b}_k\cos\theta_k\right). \tag{5}$$

При известной дальности из (4) можно получить выражения для $\cos\theta_1$, $\cos\theta_2$ и следующее выражение для азимута цели в новой ССК:

$$\tilde{\beta} = \mathbf{arctg}\left[\mathbf{tg}(\lambda/2)\frac{\mathbf{b}_1\left(\tau_2^2 - \mathbf{b}_2^2 - 2\tau_2\mathbf{R}\right) - \mathbf{b}_2\left(\tau_1^2 - \mathbf{b}_1^2 - 2\tau_1\mathbf{R}\right)}{\mathbf{b}_2\left(\tau_1^2 - \mathbf{b}_1^2 - 2\tau_1\mathbf{R}\right) + \mathbf{b}_1\left(\tau_2^2 - \mathbf{b}_2^2 - 2\tau_2\mathbf{R}\right)}\right]. \tag{6}$$

Отметим, что если длины баз одинаковы, то формулы (5 - 6) значительно упрощаются.

Полученные выражения позволяют построить итерационную процедуру оценки сферических координат, в которой на каждом шаге из избыточных измерений $\left(\hat{\tau}_1, \hat{\beta}_1, \hat{\varepsilon}_1\right)$ и $\left(\hat{\tau}_2, \hat{\beta}_2, \hat{\varepsilon}_2\right)$ привлекаются только равноточные измерения. Алгоритм оценки сферических координат состоит из следующих шагов:

1) по попарно равноточным измерениям $\left(\hat{\beta}_1, \hat{\beta}_2\right)$ и $\left(\hat{\varepsilon}_1, \hat{\varepsilon}_2\right)$ вычисляется грубая (начальная) оценка пеленга: азимута $\hat{\beta} = \mathbf{0.5}\left(\hat{\beta}_1 + \hat{\beta}_2\right)$ и угла места $\hat{\varepsilon} = \mathbf{0.5}\left(\hat{\varepsilon}_1 + \hat{\varepsilon}_2\right)$;

2) по полученному пеленгу $\left(\hat{\beta}, \hat{\varepsilon}\right)$ вычисляются косинусы углов между линией пеленга и линией $\mathbf{к}$ - й базы по формуле

$$\cos\theta_k = \cos\hat{\varepsilon}\cdot\cos\left(\hat{\beta}-\beta_k\right)+\sin\hat{\varepsilon}\cdot\sin\varepsilon_k \text{ , } (\kappa = 1,2);$$

3) для пары равноточных измерений $\left(\hat{\tau}_1,\hat{\tau}_2\right)$ по формуле (5) оценивается дальность;

4) по полученной оценке дальности $\hat{R}$ с привлечением измерений $\left(\hat{\tau}_1,\hat{\tau}_2\right)$ по формуле (6) вычисляется азимут $\tilde{\beta}$ в новой ССК;

5) угол места $\tilde{\varepsilon}$ вычисляется по полученной оценке дальности $\hat{R}$ с привлечением измерений $\left(\hat{\tau}_1,\hat{\tau}_2\right)$ и формул (2) и (4);

6) процесс заканчивается пересчетом полученной оценки пеленга $\left(\tilde{\beta},\tilde{\varepsilon}\right)$ в оценку пеленга $\left(\hat{\hat{\beta}},\hat{\hat{\varepsilon}}\right)$ старой ССК по формулам:

$$\hat{\hat{\beta}} = \tilde{\beta} + \operatorname{arctg}\left(\frac{\sin\beta_1\cos\varepsilon_1 + \sin\beta_2\cos\varepsilon_2}{\cos\beta_1\cos\varepsilon_1 + \cos\beta_2\cos\varepsilon_2}\right);$$

$$\hat{\hat{\varepsilon}} = \tilde{\varepsilon} + \operatorname{arctg}\left(\frac{\sin\beta_1\cos\varepsilon_1 + \sin\beta_2\cos\varepsilon_2}{\sqrt{\cos^2\varepsilon_1 + \cos^2\varepsilon_2 + 2\cos(\beta_1-\beta_2)\cos\varepsilon_1\cos\varepsilon_2}}\right).$$

Отметим, что если в исходной ДСК ось аппликат ортогональна плоскости, проходящей через три точки ВП1, ВП2 и ЦПП $\left(\vec{b}_1 = \left(b_1,\beta_1,0\right)\right.$ и $\left.\vec{b}_2 = \left(b_2,\beta_2,0\right)\right)$, то для оценки пеленга имеем $\hat{\hat{\beta}} = 0.5\cdot\left(\beta_1+\beta_2\right)+\tilde{\beta}$ и $\hat{\hat{\varepsilon}} = \tilde{\varepsilon}$.

Качество предлагаемого алгоритма оценивалось методом статистического моделирования. Имитационное моделирование проводилось для двухбазовой системы с одинаковыми длинами баз, в которых выполняется соотношение между СКО первичных измерений $\sigma_\tau \ll \sigma_\beta b$, обеспечиваемое корреляторами, выполненными на современной элементной базе, при допустимых временах накопления. Как показывает анализ потенциальных точностей, при этих соотношениях точности оценки первичных измерений пеленга практически не оказывают влияния на точность оценки азимута двухбазовой системы, которая обеспечивается только точностями РХС. В то же время при малых углах места оценка $\hat{\varepsilon} = 0.5\left(\hat{\varepsilon}_1+\hat{\varepsilon}_2\right)$ не улучшаема. Сравнения точностей предлагаемых оценок сферических координат, полученных имитационным моделированием при таких соотношениях с потенциально достижимыми, показало их практическое совпадение.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Черняк В.С. Многопозиционная радиолокация. - М.: Радио и связь, 1993.- 415 с.*
2. *Сиротин Ю.А., Седышев П.Ю., Терешко В.М. Оценка пространственных координат в трехбазовой системе пассивной локации с измерением пеленга на центральном пункте // Вопросы специальной радиоэлектроники. Общие вопросы*

радиоэлектроники. – М.- Таганрог : ТНИИС. – 2001. – Вып. 2. – С. 134 - 143.

Поступила 01.02.2002

***СИРОТИН Юрий Александрович**, канд. техн. наук, доцент кафедры ХВУ. В 1974 году окончил ХГУ. Область научных интересов – обработка разнородной информации в вычислительных системах, имитационное математическое моделирование.*