

УДК 621.396.98

О. И. ВОТЯКОВ*Центральное конструкторское бюро «ПРОТОН», Украина*

ПОТЕНЦИАЛЬНАЯ ТОЧНОСТЬ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КООРДИНАТ ИСТОЧНИКА РАДИОИЗЛУЧЕНИЙ В СИСТЕМЕ РАДИОМОНИТОРИНГА

В статье рассматриваются методы и алгоритмы обработки координатной информации в пространственно-распределенных системах радиомониторинга, предназначенных для оценивания координат радиоизлучающих объектов (системы пассивной радиолокации и радионавигации, определения местоположения потребителей сотовой связи, системы местоопределения объектов в помещениях и сооружениях для целей технической диагностики и пр.) На основе метода максимального правдоподобия синтезирован алгоритм определения координат источников радиоизлучений при обработке избыточного количества измерительной информации стационарных и мобильных средств. В линейном приближении получены выражения для оценки потенциальной точности определения координат источника радиоизлучения. Полученные выражения могут быть использованы для решения задач оптимизации состава и расположения стационарных и мобильных средств радиоконтроля при совместной обработке их информации.

Ключевые слова: источник радиоизлучения, система радиомониторинга, оптимизация, точность определения координат источника радиоизлучения.

Введение

Одной из основных задач радиомониторинга является задача определения положения стационарных и мобильных источников радиоизлучений (ИРИ) на местности и отображение их на картографическом фоне.

Система радиомониторинга включает в себя ряд разнесенных стационарных станций для одновременного пеленгования по команде с центральной станции и вычисления местоположения с отображением на картографическом фоне. Стационарным станциям должны быть приданы мобильные станции радиомониторинга, предназначенные для уточнения параметров выявленных ИРИ [1, 2]. В [3] показано, что для управления системой необходимо иметь значения потенциальных точностей определения координат ИРИ выбранными для измерения средствами. В связи с этим, актуальной является задача определения потенциальной точности оценивания координат ИРИ средствами радиомониторинга.

Анализ последних исследований и публикаций

В работах [1, 2] получены выражения для оценок координат ИРИ при отсутствии избыточной информации. В [3, 4] рассматривается задача объединения в избыточных системах локации оценок одного и того же вектора состояния, но полученных различными методами. Наиболее близкой является

работа [5], в которой рассмотрен обобщенный алгоритм совместной обработки данных от измерителей наземного, воздушного и космического базирования.

Цель работы

Целью работы является разработка методики определения потенциальной точности оценивания координат ИРИ группой стационарных и мобильных средств радиомониторинга.

Постановка задачи и методика её решения

Полагаем, что имеется n стационарных и m мобильных измерительных средств, координаты каждого из которых известны.

Отдельное средство может измерять азимут и угол места либо некоторые из названных параметров. Будем полагать, что измерения как стационарными, так и мобильными средствами производятся одновременно, без систематических погрешностей и их количество не меньше трех. Требуется синтезировать алгоритм статистической оценки вектора местоположения ИРИ и определить потенциальную точность этой оценки.

Поскольку измерительные средства производят измерения в различных системах координат и находятся на больших расстояниях друг от друга, то для решения поставленной задачи необходимо ввести опорную систему координат (ОСК). Выберем в ка-

честве опорной местную топоцентрическую систему координат (ТПСК), начало которой связано с точкой стояния первого стационарного средства. Начало к-ой ТПСК ($k=1,2,\dots,n,n+1,\dots,n+m$) совпадает с точкой стояния к-го средства, ось X_k направлена на Север, а ось Y_k совпадает с направлением радиус-вектора от центра Земли до начала к-ой ТПСК, ось Z_k дополняет тройку до правой.

Истинные координаты вектора ИРИ в к-ой ТПСК можно представить как

$$\Theta_k = \begin{bmatrix} X_k \\ Y_k \\ Z_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D_k \cdot \cos \alpha_k \cdot \cos \beta_k \\ D_k \cdot \sin \beta_k \\ D_k \cdot \sin \alpha_k \cdot \cos \beta_k \end{bmatrix}, \quad (1)$$

где D_k – дальность до ИРИ в к-й ТПСК; α_k и β_k – азимут и угол места в к-й ТПСК. Пересчет координат вектора ИРИ из к-й ТПСК в опорную можно представить как

$$\Theta_1 = \begin{bmatrix} X_1 \\ Y_1 \\ Z_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_k + X_{0k} \\ Y_k + Y_{0k} \\ Z_k + Z_{0k} \end{bmatrix}, \quad (2)$$

где X_{0k}, Y_{0k}, Z_{0k} – координаты начала к-ой ТПСК в опорной ТПСК.

Рассмотрим далее представление измерений с использованием введенных систем координат для средств радиомониторинга.

Для этого учтем известные связи направляющих косинусов с азимутом и углом места ИРИ:

$$\begin{aligned} \cos \alpha_{Tk} &= \cos \alpha_k \cdot \cos \beta_k; \cos \beta_{Tk} = \\ &= \sin \beta_k; \cos \gamma_{Tk} = \sin \alpha_k \cdot \cos \beta_k, \end{aligned} \quad (3)$$

а также между направляющими косинусами и координатами ИРИ:

$$\cos \alpha_{Tk} = \frac{X_k - X_{0k}}{\sqrt{(X_k - X_{0k})^2 + (Y_k - Y_{0k})^2 + (Z_k - Z_{0k})^2}};$$

$$\cos \beta_{Tk} = \frac{Y_k - Y_{0k}}{\sqrt{(X_k - X_{0k})^2 + (Y_k - Y_{0k})^2 + (Z_k - Z_{0k})^2}};$$

$$\cos \gamma_{Tk} = \frac{Z_k - Z_{0k}}{\sqrt{(X_k - X_{0k})^2 + (Y_k - Y_{0k})^2 + (Z_k - Z_{0k})^2}}$$

Из (3) находим уравнения связи для истинных значений угловых координат ИРИ в к-й ТПСК:

$$\alpha_k = \arcsin \frac{\cos \gamma_{Tk}}{\sqrt{1 - \cos^2 \beta_{Tk}}} = \arcsin \frac{Z_k}{\sqrt{(X_k)^2 + (Z_k)^2}},$$

$$\beta_k = \arcsin \cos \beta_{Tk} = \arcsin \frac{Y_k}{\sqrt{(X_k)^2 + (Y_k)^2 + (Z_k)^2}}.$$

Тогда измеренные значения угловых координат отдельным средством можно представить в виде

$$\begin{aligned} \hat{\alpha}_k &= \alpha_k + \Delta \alpha_k, \\ \hat{\beta}_k &= \beta_k + \Delta \beta_k, \end{aligned}$$

где $\Delta \alpha_k, \Delta \beta_k$ – значения ошибок измерения координат к-м средством.

С учётом измерений всех средств вектор измерений представим в виде

$$\mathbf{Q} = \left[\mathbf{Q}_1^T, \dots, \mathbf{Q}_n^T, \mathbf{Q}_{n+1}^T, \dots, \mathbf{Q}_{n+m}^T \right]^T,$$

где $\mathbf{Q}_i^T = (\hat{\alpha}_i, \hat{\beta}_i)$ – вектор измерений i -го стационарного средства ($i=1,2,\dots,n$), $\mathbf{Q}_j^T = (\hat{\alpha}_j, \hat{\beta}_j)$ – вектор измерений j -го мобильного средства ($j=n+1,n+2,\dots,n+m$), а корреляционную матрицу погрешностей измерений (с учетом их некоррелированности) размерности (2×2) в виде

$$\mathbf{K}_k = \begin{bmatrix} \sigma_{\alpha k}^2 & 0 \\ 0 & \sigma_{\beta k}^2 \end{bmatrix}, k=1,2,\dots,n+m, \quad (4)$$

где $\sigma_{\alpha k}^2, \sigma_{\beta k}^2$ – дисперсии погрешностей измерения угловых координат соответствующими средствами.

С учетом (4) корреляционную матрицу погрешностей всех измерений (при условии их некоррелированности) можно представить в блочном виде

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} \mathbf{K}_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \mathbf{K}_2 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & \mathbf{K}_{n+m} \end{bmatrix}.$$

Будем полагать, что погрешности измерений распределены по нормальному закону, тогда с точностью до констант функция правдоподобия примет вид:

$$P(\Theta_1 / \mathbf{Q}) = C \times \exp \left\{ -\frac{1}{2} \mathbf{G}(\Theta_1) \right\},$$

где

$$\mathbf{G}(\Theta_1) = [\mathbf{Q} - \mathbf{F}(\Theta_1)]^T \mathbf{K}^{-1} [\mathbf{Q} - \mathbf{F}(\Theta_1)],$$

$$\mathbf{F}(\Theta_1) = \left[\mathbf{F}_1^T, \dots, \mathbf{F}_n^T, \mathbf{F}_{n+1}^T, \dots, \mathbf{F}_{n+m}^T \right]^T \quad (5)$$

– вектор, элементами которого являются функции, связывающие измерения с оцениваемыми параметрами с учетом (2), т.е.

$$\mathbf{F}_k = \begin{bmatrix} \mathbf{F}_{k1} \\ \mathbf{F}_{k2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \arcsin \frac{Z_1 - Z_{0k}}{\sqrt{(X_1 - X_{0k})^2 + (Z_1 - Z_{0k})^2}} \\ \arcsin \frac{Y_1 - Y_{0k}}{\sqrt{(X_1 - X_{0k})^2 + (Y_1 - Y_{0k})^2 + (Z_1 - Z_{0k})^2}} \end{bmatrix}.$$

Отметим, что состав измеряемых пеленгов может быть произвольным, однако их количество должно быть не менее минимально необходимого для определения вектора параметров ИРИ.

Поскольку функции \mathbf{F}_1 нелинейные, то для нахождения искомых параметров следует применять итерационные методы, для которых используют линейные приближения векторной функции.

Полагая, что ошибки оценивания невелики, разложим вектор-функцию (5) в ряд Тэйлора в точке, соответствующей оценочным значениям

$$\hat{\Theta}_1 = \left[\hat{X}_1, \hat{Y}_1, \hat{Z}_1 \right]^T,$$

и ограничимся линейными членами:

$$\mathbf{F}(\hat{\Theta}_1) = \mathbf{F}(\Theta_1) + \frac{\partial \mathbf{F}(\hat{\Theta}_1)}{\partial \hat{\Theta}_1} \Delta \hat{\Theta}_1 = \mathbf{F}(\Theta_1) + \mathbf{A} \Delta \hat{\Theta}_1,$$

где $\Theta_1 = [X_1, Y_1, Z_1]^T$ – истинные значения параметров в опорной системе координат, а

$$\mathbf{A} = \frac{d\mathbf{F}(\hat{\Theta}_1)}{d\hat{\Theta}_1} = \begin{bmatrix} \frac{\partial F_{11}}{\partial \hat{X}_1} & \frac{\partial F_{11}}{\partial \hat{Y}_1} & \frac{\partial F_{11}}{\partial \hat{Z}_1} \\ \frac{\partial F_{12}}{\partial \hat{X}_1} & \frac{\partial F_{12}}{\partial \hat{Y}_1} & \frac{\partial F_{12}}{\partial \hat{Z}_1} \\ \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial F_{2n+2m}}{\partial \hat{X}_1} & \frac{\partial F_{2n+2m}}{\partial \hat{Y}_1} & \frac{\partial F_{2n+2m}}{\partial \hat{Z}_1} \end{bmatrix}$$

– матрица $3 \times 2(n+m)$.

Тогда [5]

$$\Delta \hat{\Theta}_1 = (\mathbf{A}^T \mathbf{K}^{-1} \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{K}^{-1} \Delta \mathbf{Q},$$

где $\Delta \mathbf{Q} = [\mathbf{Q} - \mathbf{F}(\hat{\Theta}_1)]^T$.

Простая итерационная градиентная процедура уточнения параметров на шаге $s+1$ будет выглядеть следующим образом:

$$(\hat{\Theta}_1)_{s+1} = (\hat{\Theta}_1)_s + (\Delta \hat{\Theta}_1)_s = (\hat{\Theta}_1)_s + (\mathbf{A}^T \mathbf{K}^{-1} \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{K}^{-1} (\mathbf{Q} - \mathbf{F}((\hat{\Theta}_1)_s)).$$

Итерационный процесс заканчивается, когда приращения оценок параметров станут меньше заданных. Потенциальная точность оценивания параметров определяется корреляционной матрицей погрешностей совместно эффективных оценок этих же параметров, которая является обратной к так называемой информационной матрице Фишера [4]. Согласно классической процедуре необходимо вычислить матрицу Фишера для всех параметров:

$$\mathbf{K}_{\Theta_1}^{-1} = \frac{d^2 \ln P(\Theta_1 / \mathbf{Q})}{d^2 \Theta_1}. \quad (6)$$

Производные берутся при истинных значениях параметров вектора Θ_1 . Матрица \mathbf{K}_{Θ_1} размерностью (3)х(3) дает корреляционную матрицу совместно эффективных оценок Θ_1 .

При линейном приближении (6) получим:

$$\mathbf{K}_{\hat{\Theta}_1} = (\mathbf{A}^T \mathbf{K}^{-1} \mathbf{A})^{-1}.$$

В случае некоррелированных измерений матрицы \mathbf{K} и \mathbf{K}^{-1} являются диагональными. Тогда

$$\mathbf{K}_{\Theta_1} = \begin{bmatrix} \mathbf{K}_{\Theta 11} & \mathbf{K}_{\Theta 12} & \mathbf{K}_{\Theta 13} \\ \mathbf{K}_{\Theta 21} & \mathbf{K}_{\Theta 22} & \mathbf{K}_{\Theta 23} \\ \mathbf{K}_{\Theta 31} & \mathbf{K}_{\Theta 32} & \mathbf{K}_{\Theta 33} \end{bmatrix},$$

где $\mathbf{K}_{\Theta ii} = \sum_{k=1}^{n+m} \left(\frac{\partial F_{k1}}{\partial U_i} \frac{1}{\sigma_{\alpha k}^2} + \frac{\partial F_{k2}}{\partial U_i} \frac{1}{\sigma_{\beta k}^2} \right)^2$;

$$\mathbf{K}_{\Theta ij} = \sum_{k=1}^{n+m} \left(\frac{\partial F_{k1}}{\partial U_i} \frac{1}{\sigma_{\alpha k}^2} + \frac{\partial F_{k2}}{\partial U_i} \frac{1}{\sigma_{\beta k}^2} \right) \cdot \left(\frac{\partial F_{k1}}{\partial U_j} \frac{1}{\sigma_{\alpha k}^2} + \frac{\partial F_{k2}}{\partial U_j} \frac{1}{\sigma_{\beta k}^2} \right);$$

$$U_1 = X_1, U_2 = Y_1, U_3 = Z_1.$$

Заключення

Основной результат статьи заключается в получении соотношений для определения потенциальной точности оценивания координат ИРИ группой стационарных и мобильных средств радиоконтроля. Полученные выражения для точностных характеристик могут быть использованы для решения задач оптимизации состава и расположения стационарных и мобильных средств радиомониторинга при совместной обработке информации от них [3].

Литература

1. *Radio Monitoring: Problems, Methods, and Equipments [Текст] / A. Rembovski, A. Ashikhmin, V. Kozmin, S. Smolski. – London : Springer, 2011. – 532 p.*
2. *ITU. Publications: Recommendation ITU-RSM.1392-1. Essential requirement for a spectrum monitoring station for developing countries [Электронный ресурс]. – Женева : МСЭ – 2011. – 6 с. – Режим доступа к документу: <http://www.itu.int/dms/pubrec/int->*

r/rec/sm/R-REC-SM.1392-2-201102-1!!PDF-E.pdf. – 4.11.2014.

3. *Методический подход к оптимизации задачи местоопределения источников радиоизлучений в системе радиомониторинга [Текст] / О. И. Вотяков, В. С. Кузниченко, В. Л. Петров, Г. Г. Писарёнок // Системи управління, навігації та зв'язку : зб. наук. пр. / Центр. НДІ навігації та упр. – Вип. 2 (10). – Київ, 2009. – С. 32-35.*

4. *Багдасярян, С. Т. Оптимизация оценивания координат объекта многопозиционной радиолокационной системой при избыточности информации [Текст] / С. Т. Багдасярян, В. Р. Хачатуров // Радиотехника и электроника. – 1982. – Т. 37, № 10. – С. 1839 – 1846.*

5. *Огороднійчук, М. Д. Узагальнений алгоритм сумісної обробки на борту ЛА навігаційних даних вимірювачів з елементами наземного, повітряного і космічного базування [Текст] / М. Д. Огороднійчук // Зб. наук. праць Державного науково-дослідного інституту в авіації. Вип. 1 (8). – Київ, 2005. – С. 97 – Е92-1. 106.*

Поступила в редакцію 4.11.2014, рассмотрена на редколлегии 18.11.2014

Рецензент: д-р техн. наук, проф., зав. каф. теоретической и прикладной системотехники С. И. Шматков, Харьковский национальный университет им. В. Н. Каразина, Харьков.

ПОТЕНЦІАЛЬНА ТОЧНІСТЬ ВИЗНАЧЕННЯ КООРДИНАТ ДЖЕРЕЛА РАДІОВИПРОМІНЮВАННЯ У СИСТЕМІ РАДІОМОНІТОРИНГУ

О. І. Вотяков

В статті розглядаються методи і алгоритми обробки координатної інформації в просторово-розподілених системах радіомоніторингу, призначених для оцінювання координат джерела радіовипромінювання (системи пасивної радіолокації і радіонавігації, визначення місцеположення споживачів стільникового зв'язку, системи місцевизначення об'єктів в приміщеннях і спорудах з метою технічної діагностики і ін.) На основі методу максимальної правдоподібності синтезовано алгоритм визначення координат джерел радіовипромінювань при обробці надмірної кількості вимірювальної інформації стаціонарних і мобільних засобів. В лінійному наближенні отримано вирази для оцінки потенційної точності визначення координат джерела радіовипромінювання. Отримані вирази можуть бути використані для вирішення задач оптимізації складу і розташування стаціонарних і мобільних засобів радіоконтролю при сумісній обробці їх інформації.

Ключові слова: джерело радіовипромінювання, система радіомоніторингу, оптимізація, точність визначення координат джерела радіовипромінювання.

POTENTIAL EXACTNESS OF DETERMINATION OF CO-ORDINATES OF SOURCE OF RADIO RADIATION IN SYSTEM RADIOMONITORING

O. I. Votyakov

On the basis of method of maximal plausibility the synthesized algorithm of determination of coordinates of sources of radio radiation at treatment of surplus measuring information content of stationary and mobile facilities. In the linear approaching expressions for estimation of potential exactness of determination of coordinates of source of radio radiation got. Expressions are got can be used for the decision of tasks of optimization of composition and location of facilities of radiokontrol at compatible treatment of information of stationary and mobile facilities of radiomonitoring.

Key words: source of radio radiation, system of radiomonitoring, optimization, exactness of determination of co ordinates of source of radio radiation.

Вотяков Олег Иванович – канд. техн. наук, директор центрального конструкторського бюро «ПРОТОН», Харьков, Україна, e-mail: proton@online.kharkov.ua.