

Оптимизация маршрутов движения мобильных измерителей времени прихода импульсных сигналов при оценке координат их источников

С.Н. Разиньков, А.В. Богословский

Военно-воздушная академия им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина
394064, Российская Федерация, г. Воронеж
ул. Старых Большевиков, 54а

Исследованы среднеквадратические ошибки местоопределения импульсных источников радиоизлучения по многократным оценкам их угловых положений на основе измерений времени прихода сигналов в пространственно разнесенные позиции. Выполнена оптимизация маршрутов движения мобильных измерителей в составе двухпозиционной системы для обеспечения наилучшей точности вычисления координат излучателей.

Ключевые слова: измеритель времени прихода сигналов, пеленгаторная база, среднеквадратические ошибки оценки времени прихода сигнала, пеленгования и местоопределения объекта.

Оценки координат источников радиоизлучения в комплексах мониторинга используются для селекции потока перехватываемых сигналов и установления их принадлежности определенным передатчикам. По результатам местоопределения излучателей отдельных импульсов формируются гипотетические последовательности, частотно-временные параметры которых являются характерными признаками для распознавания типов (режимов работы) радиоэлектронных объектов [1].

В мобильных комплексах мониторинга местоположение источника радиоизлучения может определяться триангуляционным способом [2] на основе данных многократного пеленгования на маршруте движения [1; 3]. Для пеленгования импульсных излучателей в [4] предложено использовать двухпозиционную систему синхронизированных измерителей времени прихода сигналов (ВПС). Оценками угловых координат объектов являются направления на точки пересечения линий положения, построенные из позиций измерительных приемников, относительно центра пеленгационной базы [4].

Дисперсия оценки ВПС, как показано в [5], обратно пропорциональна значению интеграла от произведения спектральной плотности и парциального момента передачи энергии [6] в эквивалентной полосе циклических частот радиоканала [6]. В связи с этим точность местоопреде-

ления источника радиоизлучения зависит от его пространственного положения по отношению к каждому измерительному приемнику, вида и параметров излучаемого сигнала, типа и электрических размеров передающей и приемных антенн [5; 7].

В предлагаемой работе исследованы возможности минимизации среднеквадратической ошибки (СКО) оценки максимального правдоподобия [2] координат наземных импульсных источников радиоизлучения за счет выбора курсовых углов двух мобильных измерителей ВПС.

Цель работы – достижение наилучшей точности местоопределения объектов за счет оптимизации траекторий движения приемных постов.

Будем полагать, что источник радиоизлучения и измерители ВПС в последовательные моменты времени t_n и t_{n+1} , $n = 1, 2, 3 \dots$ размещаются в пространстве, связанном с полярной системой координат (R, φ) , как показано на рис. 1; местоположение объекта обозначено жирной точкой, позиции постов пеленгационной системы – черными квадратами, штрихпунктирной линией показана траектория движения одного из мобильных измерителей ВПС. Погрешности позиционирования приемных постов, по данным бортовой аппаратуры навигационно-временного обеспечения [8; 9], малы по сравнению с СКО местоопределения объекта σ_R и в дальнейшем не учитываются. Алгоритмы идентификации им-

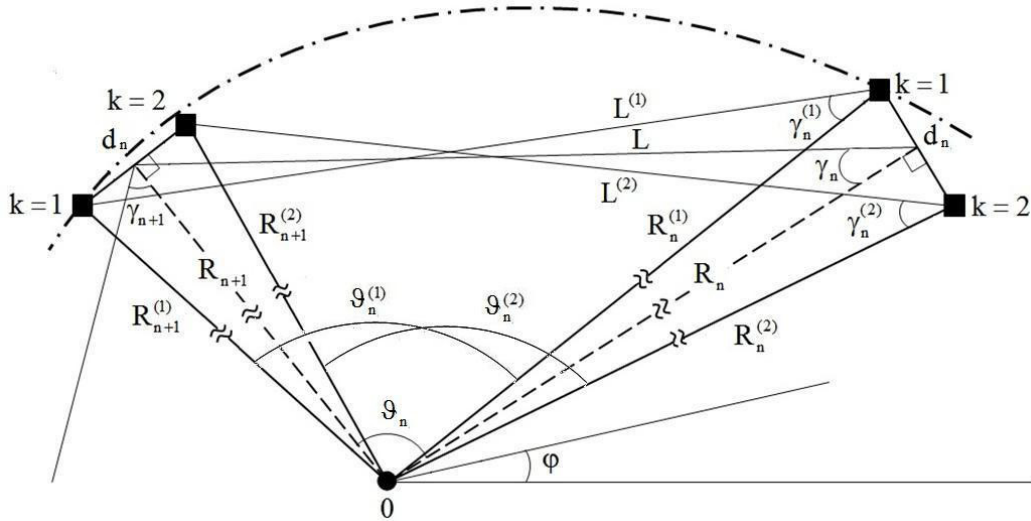


Рис. 1. Взаимное расположение источника радиоизлучения и измерителей ВПС в моменты времени t_n и t_{n+1} , $n = 1, 2, 3 \dots$

пульсов, принятых в моменты времени t_n и t_{n+1} , $n = 1, 2, 3 \dots$, с источником приведены в [1].

Излучатель характеризуется плотностью потока энергии сигнала $w_T(\omega)$ в полосе циклических частот $\omega \in [\omega_{\min}; \omega_{\max}]$ и парциальным коэффициентом усиления (КУ) антенны $G_T(\omega, \varphi)$. Измерители ВПС оснащены антеннами с парциальными КУ $G_R(\omega, \varphi)$ в полосе циклических частот $\omega \in [\tilde{\omega}_{\min}; \tilde{\omega}_{\max}]$, ограниченной значениями $\tilde{\omega}_{\min} \leq \omega_{\min}$ и $\tilde{\omega}_{\max} \geq \omega_{\max}$; нормали к раскрытиям антенн ортогональны измерительной базе; шумы приемно-усилительных каскадов представимы гауссовским белым шумом с односторонней спектральной плотностью мощности N_0 .

Для обеспечения высокой апостериорной точности регистрации разности моментов времени прихода сигналов [2] в различных точках пространства удаление $R_n^{(k)}$ излучателя от k -го приемника-измерителя, $k = 1, 2$, в n -й момент времени, $m = 1, 2, 3 \dots$, значительно превышает размеры пеленгационной базы d_n , $n = 1, 2, 3 \dots$, и расстояния $L^{(k)}$, $k = 1, 2$, между позициями, где определяются курсовые углы мобильных измерителей. В целях минимизации СКО оценок направлений прихода сигналов пеленгационная база ориентирована перпендикулярно отрезку R_n , $n = 1, 2, 3 \dots$, соединяющему ее центр с точкой, в которой расположен излучатель; при этом R_n , $n = 1, 2, 3 \dots$, существенно превосходит смещение L центра пеленгационной базы на интервале времени $\Delta t = t_{n+1} - t_n$, $n = 1, 2, 3 \dots$

Направление движения k -го приемного поста, $k = 1, 2$, в момент времени t_n , $n = 1, 2, 3 \dots$, характеризуется углом $\gamma_n^{(k)}$ между отрезками $R_n^{(k)}$ и $L^{(k)}$, $k = 1, 2$, $n = 1, 2, 3 \dots$; углы, на кото-

рые смещается центр пеленгационной базы γ_n , $n = 1, 2, 3 \dots$, отсчитываются от направлений R_n , $n = 1, 2, 3 \dots$, против часовой стрелки; величина γ_1 определяется относительно $\varphi = 0$.

Оптимизация маршрутов движения мобильных измерителей ВПС для обеспечения минимальной СКО оценки координат импульсных источников радиоизлучения заключается в нахождении курсовых углов $\hat{\gamma}_n^{(k)}$, $k = 1, 2$, $n = 1, 2, 3 \dots$, удовлетворяющих критерию

$$\begin{cases} \hat{\gamma}_n^{(k)} = \arg \min_{\gamma_n^{(k)}} \sigma_R^2; \\ \gamma_n^{(k)} \neq \pi m, \end{cases} \quad (1)$$

$k = 1, 2$, $n = 1, 2, 3 \dots$, $m = 0, 1, 2 \dots$,

где

$$\sigma_R^2 = \frac{\sigma_{\varphi n}^2 R_n^2 + \sigma_{\varphi(n+1)}^2 R_{n+1}^2}{\sin^2 \vartheta_n}, \quad n = 1, 2, 3 \dots, \quad (2)$$

$$\sigma_{\varphi n}^2 = \left(\frac{c}{d_n}\right)^2 \sum_{k=1}^2 \sigma_{t_n^{(k)}}^2, \quad (3)$$

$k = 1, 2$, $n = 1, 2, 3 \dots$

– дисперсия оценки угловых координат объекта на удалении R_n , $n = 1, 2, 3 \dots$; ϑ_n – угловое расстояние между пеленгами (рис. 1) в моменты времени t_n и t_{n+1} , $n = 1, 2, 3 \dots$;

$$\sigma_{t_n^{(k)}}^2 =$$

$$= \left\{ \frac{1}{\pi N_0} \int_{\Omega_n^{(k) \min}(\Psi_n^{(k)})}^{\Omega_n^{(k) \max}(\Psi_n^{(k)})} \omega^2 w_{R_n}^{(k)}(\omega, \Psi_n^{(k)}) d\omega \right\}^{-1}, \quad (4)$$

$k = 1, 2$, $n = 1, 2, 3 \dots$

– дисперсия оценки ВПС в k -м приемнике-измерителе, $k = 1, 2$, на дальности R_n , $n = 1, 2, 3 \dots$;

$\Omega_{n \min}^{(k)}(\varphi)$ и $\Omega_{n \max}^{(k)}(\varphi)$ – нижняя и верхняя границы эквивалентной полосы циклических частот [6] радиоканала в направлении φ , удовлетворяющие уравнению [6]

$$\begin{aligned} & \Omega_{n \max}^{(k)}\left(\Psi_n^{(k)}\right) - \Omega_{n \min}^{(k)}\left(\Psi_n^{(k)}\right) = \\ & \frac{\int_{-\infty}^{\infty} w_{R_n}^{(k)}\left(\omega, \Psi_n^{(k)}\right) d\omega}{\max_{\omega} w_{R_n}^{(k)}\left(\omega, \Psi_n^{(k)}\right)} \end{aligned} \quad (5)$$

и условиям [10]

$$\begin{cases} \Omega_{n \min}^{(k)}\left(\Psi_n^{(k)}\right) \geq \omega_{\min}, \\ \Omega_{n \max}^{(k)}\left(\Psi_n^{(k)}\right) \leq \omega_{\max}, \end{cases} \quad (6)$$

$k = 1, 2, n = 1, 2, 3 \dots;$

$$\begin{aligned} w_{R_n}^{(k)}\left(\omega, \Psi_n^{(k)}\right) &= \left(\frac{c}{2\omega R_n^{(k)}}\right)^2 \times \\ &\times G_T\left(\omega, \Psi_n^{(k)}\right) w_T(\omega) G_R\left(\omega, \Psi_n^{(k)}\right) \end{aligned} \quad (7)$$

– плотность потока энергии [6] на входе k -го измерителя ВПС, $k = 1, 2$, при $R_n, n = 1, 2, 3 \dots$,

$$\Psi_n^{(k)} = \frac{\pi}{2} + (-1)^{k+1} \frac{\pi}{2} + (-1)^k \operatorname{arctg}\left(\frac{d_n}{2R_n}\right), \quad (8)$$

$k = 1, 2, n = 1, 2, 3 \dots$

– направление на излучатель из позиции k -го приемника, $k = 1, 2$, в момент времени t_n , $n = 1, 2, 3 \dots$, c – скорость света.

Второе уравнение в (1) исключает из рассмотрения направления движения измерителей ВПС непосредственно на источник радиоизлучения, поскольку его угловые координаты априори неизвестны [9].

В соответствии с теоремой синусов [11],

$$\sin \vartheta_n = \frac{L}{R_{n+1}} \sin \gamma_n, \quad n = 1, 2, 3 \dots, \quad (9)$$

$$\sin \vartheta_n^{(k)} = \frac{L^{(k)}}{R_{n+1}^{(k)}} \sin \gamma_n^{(k)}, \quad (10)$$

$$k = 1, 2, n = 1, 2, 3 \dots;$$

дальности R_n и R_{n+1} , $n = 1, 2, 3 \dots$, согласно теореме косинусов [11], связаны выражением

$$R_{n+1}^2 = R_n^2 + L^2 - 2R_n L \cos \gamma_n, \quad (11)$$

$$n = 1, 2, 3 \dots,$$

а $R_n^{(k)}$ и $R_{n+1}^{(k)}$, $k = 1, 2, n = 1, 2, 3 \dots$ – выражением

$$\begin{aligned} \left(R_{n+1}^{(k)}\right)^2 &= \left(R_n^{(k)}\right)^2 + \left(L^{(k)}\right)^2 - \\ &- 2R_n^{(k)} L^{(k)} \cos \gamma_n^{(k)}, \end{aligned} \quad (12)$$

$k = 1, 2, n = 1, 2, 3 \dots$

Учитывая, что

$$\vartheta_n^{(k)} = \vartheta_n + (-1)^{k+1} \Psi_n^{(k)} + (-1)^k \Psi_{n+1}^{(k)}, \quad (13)$$

$k = 1, 2, n = 1, 2, 3 \dots,$

из (2)–(13) находим зависимость дисперсии оценки координат источника радиоизлучения от курсовых углов измерителей ВПС. Наибольшая точность местоопределения объекта достигается при $\hat{\gamma}_n^{(k)}$, $k = 1, 2, n = 1, 2, 3 \dots$, где первая производная (2) по $\gamma_n^{(k)}$, $k = 1, 2, n = 1, 2, 3 \dots$, обращается в нуль.

Построены маршруты движения мобильных измерителей ВПС с плоскими апертурными антеннами радиуса a_R при определении местоположения излучателя радиоимпульсов длительностью τ_0 с прямоугольной огибающей и циклической частотой несущей $\omega_0 = \frac{\omega_{\max} + \omega_{\min}}{2}$,

оснащенного плоской апертурной антенной с радиусом раскрытия a_T . Выражение для спектральной плотности излучаемой энергии имеет вид [4]

$$w_T(\omega) = W_T \frac{\sin^2\left((\omega - \omega_0)\tau_0/2\right)}{(\omega - \omega_0)^2 \tau_0}, \quad (14)$$

где

$$W_T = \int_{\omega_{\min}}^{\omega_{\max}} w_T(\omega) d\omega$$

– энергия сигнала на входе антенны источника. Значения a_T и a_R удовлетворяют условию $\omega a_{T,R} / c \geq 5$ в диапазонах циклических частот $\omega \in [\omega_{\min}; \omega_{\max}]$ и $\omega \in [\tilde{\omega}_{\min}; \tilde{\omega}_{\max}]$ соответственно; их парциальные КУ в приближении физической оптики определяются выражением [12]

$$\begin{aligned} G_{T,R}(\omega, \varphi) &= \eta_{T,R}(\omega) v_{T,R}(\omega) \times \\ &\times \operatorname{tg}^2\left(\frac{\varphi}{2}\right) J_1^2\left(\frac{\omega a_{T,R}}{c} \cos \varphi\right), \end{aligned} \quad (15)$$

где $\eta_{T,R}(\omega)$ – парциальный коэффициент полезного действия антенной системы;

$$v_{T,R}(\omega) = \sin^2\left(\frac{\omega \tau_{T,R}}{c}\right) \quad (16)$$

– парциальный коэффициент использования поверхности антенны [12];

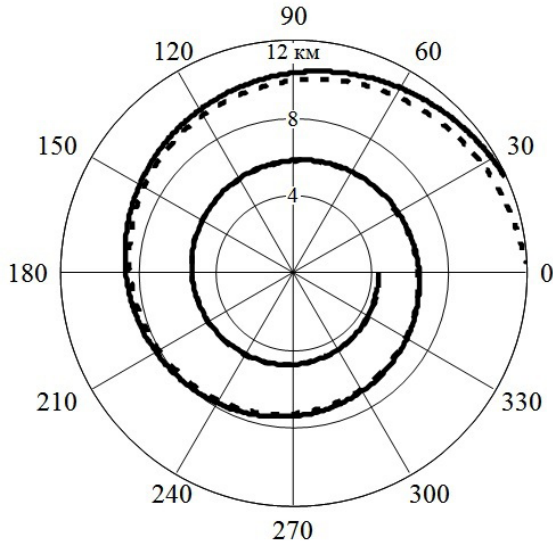


Рис. 2. Маршруты движения измерителей ВПС при постоянной измерительной базе $d_n = 2$ км, $n = 1, 2, 3 \dots$

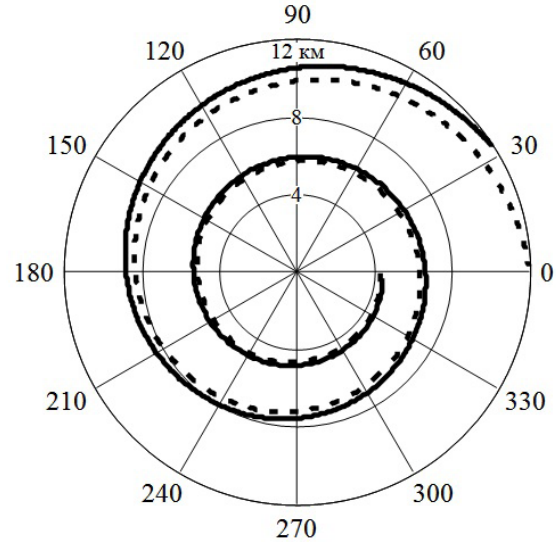


Рис. 3. Маршруты движения измерителей ВПС при измерительной базе $d_n = 0, 1R_n$, $n = 1, 2, 3 \dots$

$$\tau_{T,R} = \frac{a_{T,R}^2}{c R_{T,R}} \quad (17)$$

– время запаздывания возбуждения краев апертуры по сравнению с центром раскрытия полем со сферическим фронтом [13]; $R_T \approx \frac{4 \omega_{\max} a_T^2}{\pi c}$, $R_R \approx \frac{4 \bar{\omega}_{\max} a_R^2}{\pi c}$ – границы дальней зоны [10] для передающей и приемных антенн; $J_1(\dots)$ – функция Бесселя первого рода первого порядка.

На рис. 2 приведены маршруты движения мобильных измерителей ВПС при местоопределении излучателя радиоимпульсов длительностью $\tau_0 = 5$ нс с нормированной циклической частотой несущей $\frac{\omega_0}{2\pi} = 2$ ГГц при $d_n = 2$ км; радиусы раскрытия антенн $a_{T,R} = 0,3$ м; парциальные коэффициенты полезного действия антенных систем $\eta_{T,R}(\omega) \equiv \tilde{\eta}_{T,R} = 0,9$; главный луч энергетической диаграммы направленности антенны [6] источника радиоизлучения ориентирован в направлении $\varphi = 0$. Сплошной линией изображена траектория движения первого измерителя, смещенного относительно центра измерительной базы на $-d_n/2$; штриховой линией – маршрут второго измерителя, смещенного на расстояние $d_n/2$. На рис. 3 представлены результаты, полученные при $d_n = 0, 1R_n$, а на рис. 4 – при $d_n = 0, 2R_n$.

Анализ зависимостей показывает, что наилучшая точность местоопределения источника радиоизлучения достигается при движении измерителей ВПС по траектории в виде спирали. Изменение их курсовых углов, зависящее от точности оценки ВПС в пространственно раз-

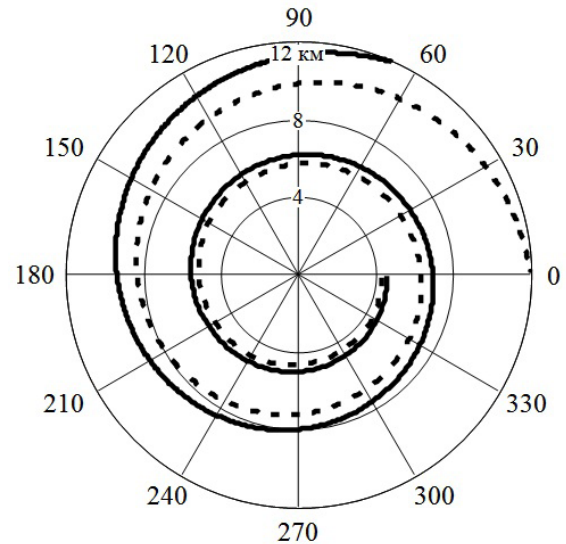


Рис. 4. Маршруты движения измерителей ВПС при измерительной базе $d_n = 0, 2R_n$, $n = 1, 2, 3 \dots$

несенных точках, возрастает относительно начального значения по мере уменьшения дальности R_n , $n = 1, 2, 3 \dots$. При этом отсутствует значительная асимметрия траекторий движения измерителей ВПС в различных секторах углов ввиду свойства спирали восстанавливать свою форму после воздействий и масштабирующих преобразований [14].

Различие маршрутов движения измерителей ВПС при постоянной и варьируемой базе наблюдается на удалении от источника радиоизлучения свыше 10 км. При приближении к объекту на расстояние не более 6 км влияние размеров базы на траектории движения приемных постов системы местоопределения снижается.

Установлено, что при положениях главного луча энергетической диаграммы направленности

антенны излучателя $\varphi = \pi/2$ и $\varphi = \pi$ длина маршрутов движения измерителей ВПС возрастает примерно в 1,2 и 1,4 раз вследствие низкой точности местоопределения в начальные моменты времени. С увеличением длительности радиоимпульсов в 2,1 раза СКО оценки координат излучателя в секторе углов $\varphi \in [0; \pi/4]$ снижается в 1,3 раза. Аналогичное изменение точности местоопределения объекта наблюдается при уменьшении циклической частоты несущей сигналов в 1,2 раза вследствие повышения эффективности их перехвата по главному лучу энергетической диаграммы направленности антенны [5].

Для априори неопределенных значений (3) и (4) в точках задания курсовых углов мобильных измерителей ВПС прокладка маршрутов их движения по критерию (1) выполняется при $\sigma_{\varphi n}^2 = \sigma_{\varphi(n+1)}^2 \equiv \sigma_{\varphi 0}^2$, $n = 1, 2, 3 \dots$; дисперсия оценки координат излучателя (2) имеет вид [2]

$$\sigma_R^2 = \sigma_{\varphi 0}^2 \frac{R_n^2 + R_{n+1}^2}{\sin^2 \vartheta_n}, \quad n = 1, 2, 3 \dots \quad (18)$$

С учетом (18) критерий выбора текущих направлений движения мобильных измерителей ВПС (1) эквивалентен правилу перемещения центра измерительной базы при минимизации погрешности местоопределения излучателя [9]:

$$\begin{cases} \hat{\gamma}_n = \arg \min_{\gamma_n} \sigma_R^2; \\ \gamma_n \neq \pi m, \end{cases} \quad (19)$$

$$n = 1, 2, 3 \dots, \quad m = 0, 1, 2 \dots$$

В результате решения уравнения, полученного путем приравнивания нулю первой производной σ_R^2 по γ_n , $n = 1, 2, 3 \dots$, находится значение $\hat{\gamma}_n$, $n = 1, 2, 3 \dots$, удовлетворяющее (19)

$$\hat{\gamma}_n = \pm \arccos \left(\frac{\beta_n - \sqrt{\beta_n^2 - 4}}{2} \right) + \pi m, \quad (20)$$

$$n = 1, 2, 3 \dots, \quad m = 0, 1, 2 \dots,$$

где [9]

$$\beta_n = \frac{2\alpha_n^4 + 7\alpha_n^2 + 1}{\alpha_n(3\alpha_n^2 + 2)}, \quad n = 1, 2, 3 \dots, \quad (21)$$

$\alpha_n = R_n/L$; знак обратной тригонометрической функции и число m выбираются таким образом, чтобы центр измерительной базы последовательно смещался к точке, в которой расположен излучатель.

Из (8)–(13), (20) с учетом (21) определим тангенс курсового угла k -го, $k = 1, 2$, измерителя ВПС, удовлетворяющий критерию (1),

$$\begin{aligned} \operatorname{ctg} \gamma_n^{(k)} = & \left[\alpha_{n+1} \left(4\alpha_n^2 + \tilde{\alpha}_n^2 \right) + \right. \\ & + (-1)^k \sqrt{\alpha_{n+1}^2 - \sin^2 \gamma_n} \left(4\alpha_n \alpha_{n+1} + \tilde{\alpha}_n \tilde{\alpha}_{n+1} \right) + \\ & + (-1)^{k+1} 2 \sin \gamma_n \left(\tilde{\alpha}_n \alpha_{n+1} - \alpha_n \tilde{\alpha}_{n+1} \right) \left. \right] / \\ & / \left[\sin \gamma_n \left(4\alpha_n \alpha_{n+1} + \tilde{\alpha}_n \tilde{\alpha}_{n+1} \right) + \right. \\ & + (-1)^k 2 \sqrt{\alpha_{n+1}^2 - \sin^2 \gamma_n} \left(\tilde{\alpha}_n \alpha_{n+1} - \alpha_n \tilde{\alpha}_{n+1} \right) \left. \right], \end{aligned} \quad (22)$$

где $\tilde{\alpha}_n = d_n/L$.

Согласно (20)–(22), траектории движения приемных постов системы местоопределения, при которых обеспечивается минимальная дисперсия оценки координат импульсного источника радиоизлучения по критерию (1), имеют форму спиралей, не зависящую от СКО измерения ВПС. Точность вычисления координат объекта при фиксированных погрешностях измерений возрастает при уменьшении дальности до него.

Таким образом, исследованы СКО местоопределения импульсных источников радиоизлучения по многократным оценкам их угловых положений на основе измерений ВПС в разнесенных позициях. Разработаны алгоритмы и проведен анализ результатов оптимизации маршрутов движения мобильных измерителей ВПС для обеспечения наилучшей точности вычисления координат излучателей.

Список литературы

1. Радзиевский В.Г., Сирота А.А. Теоретические основы радиоэлектронной разведки. М.: Радиотехника, 2004. 432 с.
2. Кондратьев В.С., Котов А.В., Марков Л.Н. Многопозиционные радиотехнические системы / под ред. В.В. Цветнова. М.: Радио и связь, 1986. 264 с.
3. Мельников Ю.П. Воздушная радиотехническая разведка (методы оценки эффективности). М.: Радиотехника, 2005. 304 с.
4. Радзиевский В.Г., Трифонов П.А. Обработка сверхширокополосных сигналов и помех. М.: Радиотехника, 2009. 288 с.
5. Разиньков С.Н., Богословский А.В. Исследование точности оценки угловых координат источников сверхширокополосных сигналов // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2012. Т. 15. № 2. С. 22–30.
6. Авдеев В.Б. Угло-временные, угло-частотные и угло-энергетические характеристики излучения и приема негармонических сигналов // Антенны. 2005. № 3 (94). С. 40–50.
7. Афанасьев О.В., Разиньков С.Н. Точность пеленгования и местоопределения источников сверхширокополосных сигналов в дальномерных системах // Антенны. 2015. № 5(216). С. 52–57.

8. Осипов Е.Б. Способ вывода летательного аппарата на радиоизлучающий объект с использованием оптимальной обработки результатов многократного пеленгования // Вестник Воронежского государственного технического университета. Сер.: Системы автоматизированного проектирования и системы автоматизации производства. 2003. Вып. 3.3. С. 21–25.
9. Пономарев А.А., Межуев А.М. Оптимизация маршрута летательного аппарата, определяющего местоположение цели по ее угловым координатам // Обнаружение, распознавание и определение параметров образов объектов. Методы и алгоритмы / под ред. А.В. Коренного. М.: Радиотехника, 2012. С. 21–29.
10. Разиньков С.Н. Спектральные энергетические уравнения передачи негармонических сигналов и их применение в сверхширокополосных радиосистемах // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2011. Т. 18. № 3. С. 12–18.
11. Выгодский М.Я. Справочник по элементарной математике. М.: Наука, 1966. 424 с.
12. Авдеев В.Б. Энергетические характеристики направленности антенн и антенных систем при излучении и приеме сверхширокополосных сигналов и сверхкоротких импульсов // Антенны. 2002. № 7 (62). С. 5–27.
13. Драбкин А.Л., Зузенко В.Л. Антенно-фидерные устройства. М.: Сов. радио, 1961. 816 с.
14. Савелов А.А. Плоские кривые. Систематика, свойства, применение / под ред. А.П. Нордена. М.: Наука, 1960. 293 с.

Optimization of routes of the movement of mobile measuring instruments of time of arrival of pulse signals at an assessment of coordinates of their sources

S.N. Razin'kov, A.V. Bogoslovsky

Mean square errors of a fixing of pulse sources of a radio emission by repeated estimates of their angular provisions in various points of space on the basis of measurements of time of arrival of signals in spatially the carried positions are investigated. It optimization of routes of the movement of mobile measuring instruments in structure of on-off system for ensuring the best accuracy of finding of coordinates of radiators is executed.

Keywords: measuring instrument of time of arrival of signals, direction finding base, mean square errors of an assessment of time of arrival of a signal, measurement of the direction and definition of a place of object.
