УДК 621.396.98

Е.А. Лопатин, С.С. Семенюк

Метод разбиения множества распределенных в пространстве датчиков на разностно-дальномерные группы определения местоположения при оперативном мониторинге радиообстановки

Приводится исследование комбинаторных, алгоритмических и других аспектов разбиения заданного множества распределенных в пространстве датчиков на группы определения местоположения разностно-дальномерным способом при оперативном мониторинге радиообстановки. Предлагается метод разбиения множества распределенных в пространстве датчиков на группы определения местоположения по критерию минимальной погрешности определения координат в зоне оперативного мониторинга радиообстановки.

Ключевые слова: множество датчиков, разбиение множества, разностно-дальномерный способ, мониторинг радиообстановки.

В настоящее время среди достаточно большого арсенала систем оперативного мониторинга радиообстановки (МРО) и определения местоположения (ОМП) источников радиоизлучений (ИРИ) широкое применение получили системы, функционирующие на основе разностно-дальномерного (гиперболического) метода. Одно из наиболее перспективных направлений развития систем данного типа состоит в создании распределенных в пространстве сетей многофункциональных малогабаритных датчиков, в задачи которых входит поиск, обнаружение, первичный технический анализ сигналов, а также ОМП ИРИ.

Основная задача при проектировании систем МРО состоит в синтезе ее составных элементов таким образом, чтобы вероятность обнаружения сигналов ИРИ, которая в значительной степени зависит от реализуемых методов поиска, была максимальна. Применительно к распределенной сети датчиков поиск сигналов по частоте может быть реализован либо путем синхронного сканирования частотного диапазона всеми датчиками одновременно, либо путем разбиения множества датчиков на группы поиска и пеленгования. В первом случае снижается оперативность поиска, но повышается точность ОМП, во втором – повышается оперативность, однако при этом точность ОМП снижается [1]. Минимальное число датчиков в группе определяется минимально необходимым числом опорных точек для ОМП (на плоскости – три, в пространстве – четыре), максимальное – требованием по оперативности проведения поиска. В силу этого одна из частных задач при проектировании распределенной сети датчиков состоит в разработке методов разбиения множества распределенных в пространстве датчиков на группы, имеющие наилучшую геометрическую конфигурацию для минимизации погрешностей определения координат ИРИ в зоне МРО.

Следует отметить, что задача определения наилучшей геометрической конфигурации системы ОМП по критерию наименьшей погрешности ОМП в пространстве решена в спутниковых навигационных системах GPS NAVSTAR и ГЛОНАСС [2, 3]. Решение данной задачи реализуется при выборе навигационным приемником пользователя оптимального рабочего созвездия спутников с целью минимизации влияния взаимного расположения навигационных космических аппаратов и пользователя на точность определения координат псевдодальномерным способом. При этом происходит выбор одной комбинации из множества находящихся в зоне радиовидимости пользователя спутников, а не нескольких непересекающихся комбинаций. Кроме того, выбор комбинации элементов системы ОМП происходит по критерию минимальной погрешности в точке, а не в области пространства.

В силу этого требуется провести исследование комбинаторных, алгоритмических и других аспектов разбиения заданного множества распределенных в пространстве датчиков на разностно-дальномерные группы, а также разработать метод разбиения множества распределенных в пространстве датчиков на группы определения местоположения разностно-дальномерным способом по критерию минимальной погрешности ОМП в зоне МРО.

Пусть имеет место N датчиков, в задачи которых входит обнаружение и регистрация сигналов ИРИ в прямоугольной зоне МРО со сторонами a и b для последующего ОМП объектов МРО. Пусть также датчики равномерно распределены в объеме пространства Θ с плотностью $\rho = N/\Theta$. Положение датчиков характеризуется векторами координат $\mathbf{J}_k = [x_k\ y_k\ z_k]^{\mathrm{T}}, k = 1(1)N$.

Тогда множество датчиков можно представить в виде множества их порядковых номеров $W_{\{N\}} = \{w_k\}_{k=1}^{N} = \{1, 2, ..., N\}$.

При этом расстояние от ИРИ до k-го датчика описывается выражением

$$d_{\text{ИД}}^{(k)} = \sqrt{(x - x_k)^2 + (y - y_k)^2 + (z - z_k)^2}\,, \tag{1}$$

где x, y, z – координаты ИРИ.

Решаемая задача состоит в разбиении множества датчиков $W_{\{N\}}$ на Q непересекающихся подмножеств, обладающих наилучшей геометрической конфигурацией относительно зоны МРО по критерию минимальной погрешности ОМП.

Геометрический фактор разностно-дальномерной сети датчиков относительно зоны МРО. Пусть зона МРО представляет собой совокупность $H = \alpha \cdot \beta$ элементарных квадратов таких, что

$$a = \alpha \cdot \Delta l \text{ и } b = \beta \cdot \Delta l\,, \tag{2}$$

где Δl – длина стороны элементарного квадрата.

В таких условиях имеет место матрица $\mathbf{D}_{[\alpha,\beta]} = \left\| d_{ij} \right\|_{\alpha}^{\beta}$ элементарных квадратов, каждому элементу которой соответствует вектор координат $\mathbf{J}_{ij} = \left[x_{ij}\ y_{ij}\ z_{ij} \right]^{\mathrm{T}}$.

Коэффициент геометрии (геометрический фактор) такой разностно-дальномерной сети из N датчиков в точке пространства $\mathbf{J}_{ij} = \left[x_{ij}\ y_{ij}\ z_{ij} \right]^{\mathrm{T}}$ определяется выражением [1]

$$k_{\Gamma}(\mathbf{J}_{ij}) = \frac{\left[\operatorname{tr}\left((\mathbf{G}_{ij}^{\mathrm{T}} \mathbf{G}_{ij})^{-1} \right) \right]^{1/2}}{\sigma_P}\,, \tag{3}$$

где σ_P – среднеквадратическая ошибка оценки разности расстояний; $\mathbf{G}_{ij}$ – матрица Якоби (при условии, что первый датчик – опорный) вида

$$\mathbf{G}_{ij} = \mathbf{G}\left(J_{ij} \right) = \begin{bmatrix} \frac{x_{ij} - x_2}{d_{\text{ИД}}^{(2)}} - \frac{x_{ij} - x_1}{d_{\text{ИД}}^{(1)}} & \frac{y_{ij} - y_2}{d_{\text{ИД}}^{(2)}} - \frac{y_{ij} - y_1}{d_{\text{ИД}}^{(1)}} & \frac{z_{ij} - z_2}{d_{\text{ИД}}^{(2)}} - \frac{z_{ij} - z_1}{d_{\text{ИД}}^{(1)}} \\ \frac{x_{ij} - x_3}{d_{\text{ИД}}^{(3)}} - \frac{x_{ij} - x_1}{d_{\text{ИД}}^{(1)}} & \frac{y_{ij} - y_3}{d_{\text{ИД}}^{(3)}} - \frac{y_{ij} - y_1}{d_{\text{ИД}}^{(1)}} & \frac{z_{ij} - z_3}{d_{\text{ИД}}^{(3)}} - \frac{z_{ij} - z_1}{d_{\text{ИД}}^{(1)}} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{x_{ij} - x_k}{d_{\text{ИД}}^{(k)}} - \frac{x_{ij} - x_1}{d_{\text{ИД}}^{(1)}} & \frac{y_{ij} - y_k}{d_{\text{ИД}}^{(k)}} - \frac{y_{ij} - y_1}{d_{\text{ИД}}^{(1)}} & \frac{z_{ij} - z_k}{d_{\text{ИД}}^{(k)}} - \frac{z_{ij} - z_1}{d_{\text{ИД}}^{(1)}} \\ \vdots & \vdots & \\ \frac{x_{ij} - x_N}{d_{\text{ИД}}^{(N)}} - \frac{x_{ij} - x_1}{d_{\text{ИД}}^{(1)}} & \frac{y_{ij} - y_N}{d_{\text{ИД}}^{(N)}} - \frac{y_{ij} - y_1}{d_{\text{ИД}}^{(1)}} & \frac{z_{ij} - z_N}{d_{\text{ИД}}^{(N)}} - \frac{z_{ij} - z_1}{d_{\text{ИД}}^{(1)}} \end{bmatrix};$$

$\operatorname{tr}(\cdot)$ – след матрицы.

Тогда с помощью выражения (3) могут быть вычислены коэффициенты геометрии в точках, соответствующих элементам матрицы $\mathbf{D}_{[\alpha,\beta]}$, и получена матрица коэффициентов геометрии в зоне МРО вида

$$\mathbf{K}_{\Gamma[\alpha,\beta]} = \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & \cdots & k_{1i} & \cdots & k_{1\alpha} \\ k_{21} & k_{22} & \cdots & k_{2i} & \cdots & k_{2\alpha} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & & \vdots \\ k_{j1} & k_{j2} & \cdots & k_{ji} & \cdots & k_{j\alpha} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \ddots & \vdots \\ k_{\beta1} & k_{\beta2} & \cdots & k_{\beta i} & \cdots & k_{\beta\alpha} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{K}_1 \\ \mathbf{K}_2 \\ \vdots \\ \mathbf{K}_j \\ \vdots \\ \mathbf{K}_\beta \end{bmatrix}, \tag{4}$$

где $\mathbf{K}_j$ – j-я вектор-строка матрицы $\mathbf{K}_\Gamma$.

Преобразуем матрицу $\mathbf{K}_{\Gamma[\alpha,\beta]}$ в конечное множество мощностью $H=\alpha\cdot\beta$, объединив строки матрицы по правилу вида

$$K_{\Gamma\{H\}}=\bigcup_{j=1}^{\beta}K_j=\{k_1,k_2,...,k_i,...,k_H\}. \tag{5}$$

В качестве меры погрешности, вносимой геометрической конфигурацией разностно-дальномерной сети датчиков в ошибку определения местоположения ИРИ в зоне МРО, могут быть использованы следующие показатели:

– максимальный коэффициент геометрии в зоне МРО:

$$k_{\max}=\max\left(K_{\Gamma\{H\}}\right); \tag{6}$$

– вероятность обеспечения требуемого значения коэффициента геометрии $k_{\text{тр}}$ в зоне МРО, определяемая выражением

$$P_{k_{\text{тр}}}=P\left(k<k_{\text{тр}}\right)=\frac{1}{H}\sum_{j=1}^{H}I\left(k_j<k_{\text{тр}}\right), \tag{7}$$

где функция $I\left(k_j<k_{\text{тр}}\right)$ – индикатор события $\left(k_j<k_{\text{тр}}\right)$,

$$I\left(k_j<k_{\text{тр}}\right)=\begin{cases}1, k_j<k_{\text{тр}},\\0, k_j\ge k_{\text{тр}}.\end{cases} \tag{8}$$

Построим статистический ряд распределения элементов множества $K_{\Gamma\{H\}}$. Для этого произведем ранжирование элементов k_i:

$$K'_{\Gamma\{H\}}=\mathrm{SORT}\uparrow\left(K_{\Gamma\{H\}}\right)=\mathrm{SORT}\uparrow\left(\{k_1,k_2,...,k_i,...,k_H\}\right), \tag{9}$$

где $\mathrm{SORT}\uparrow\left(B_{<n>}\right)$ – операция сортировки по возрастанию значений элементов некоторой последовательности $B_{<n>}$.

Множество $K'_{\Gamma\{H\}}$ представляет собой конечное упорядоченное множество, для любых элементов которого имеют место неравенства вида

$$k'_j\le k'_j,\left[j=1(1)H-1\right],\quad k'_1=\min\left(K_{\Gamma\{H\}}\right),\ k'_H=\max\left(K_{\Gamma\{H\}}\right). \tag{10}$$

Приведем множество $K'_{\Gamma\{H\}}$ к интервальному вариационному ряду распределения элементов множества $K_{\Gamma\{H\}}$. Для определения числа интервалов воспользуемся наиболее распространенной формулой Стерджесса [4]

$$\gamma=1+3{,}322\cdot\lg H. \tag{11}$$

С учетом значения (11) величина интервала вариационного ряда определяется как

$$\Delta k''=\frac{k'_H-k'_1}{\gamma}=\frac{\max\left(K_{\Gamma\{H\}}\right)-\min\left(K_{\Gamma\{H\}}\right)}{1+3{,}322\cdot\lg H}. \tag{12}$$

Таким образом, имеет место интервальный вариационный ряд элементов множества $K_{\Gamma\{H\}}$ в виде упорядоченного множества $K''_{\Gamma\{\gamma\}}$, для любых $i=1(1)\gamma-1$ элементов которого справедливо равенство

$$k''_{i+1}=k''_i+\Delta k'',\ \left[i=1(1)\gamma-1\right]. \tag{13}$$

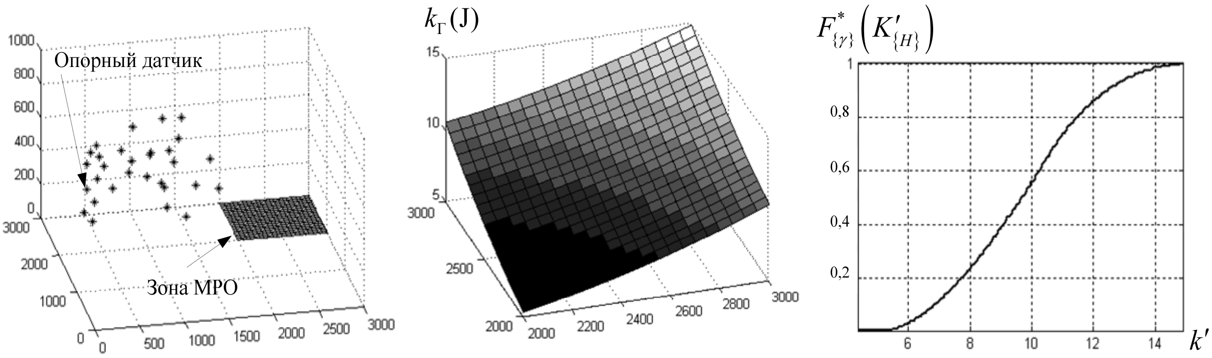
Значение статистической функции распределения элементов множества $K_{\Gamma\{H\}}$ для любого значения i-го элемента k'_i может быть вычислено по формуле

$$F^*_{\{\gamma\}}\left(k'_i\right)=\frac{1}{\gamma}\sum_{j=1}^{\gamma}I\left(k'_i<k''_j\right),\ \left[i=1(1)H\right]. \tag{14}$$

В свою очередь выражение для статистической функции распределения $F^*_{\{\gamma\}}(k'_d)$ элементов множества $K_{\Gamma\{H\}}$ имеет вид

$$F^*_{\{\gamma\}}\left(K'_{\Gamma\{H\}}\right)=\begin{cases} 0, \; k'_i < k''_1, \\ \dfrac{j}{\gamma}, \; k''_j < k'_i \le k''_{j+1}, \; [j=1(1)\gamma],[i=1(1)H], \\ 1, \; k'_i < k''_\gamma. \end{cases} \tag{15}$$

Диаграммы, отражающие распределение значений коэффициента геометрии при ОМП ИРИ в зоне МРО распределенной в пространстве разностно-дальномерной сетью датчиков представлены на рис. 1.



а – размещение 30 датчиков в пространстве относительно зоны МРО

б – значения коэффициента геометрии в зоне МРО

в – статистическая функция распределения коэффициентов геометрии

Рис. 1. Распределение коэффициентов геометрии сети из 30 датчиков в зоне МРО

Комбинаторные аспекты разбиения множества датчиков. В соответствии с теорией множеств разбиение множества – это представление его в виде объединения произвольного числа попарно непересекающихся подмножеств. В данном случае задача состоит в разбиении множества датчиков $W_{\{N\}}$ на Q групп таким образом, чтобы семейство подмножеств $\{S_{n\{m\}}\}_{n=1}^{Q}$ удовлетворяло следующим условиям:

– в каждой из Q групп должно быть по m датчиков:

$$\forall|S_n| = m, \, [n=1(1)Q]; \tag{16}$$

– множества $S_{n\{m\}}$, соответствующие группам датчиков, должны принадлежать исходному множеству $W_{\{N\}}$:

$$\forall S_{n\{m\}} \subseteq W_{\{N\}}; \tag{17}$$

– искомые множества не должны пересекаться:

$$\forall S_{l\{m\}} \cap S_{k\{m\}} = \varnothing, \, [l=1(1)Q], [k=1(1)Q], n \ne k; \tag{18}$$

– исходное множество $W_{\{N\}}$ должно быть равно сумме искомых подмножеств $S_{n\{m\}}$:

$$W_{\{N\}} = \bigcup_{n=1}^{Q} S_{n\{m\}}; \tag{19}$$

– число датчиков в группе и число групп должны быть такими, что

$$N \equiv 0 \bmod m, \text{т.е. } N \vdots m, \; Q = \frac{N}{m}. \tag{20}$$

Из комбинаторики известно, что число всех возможных неупорядоченных m-элементных подмножеств (комбинаций) множества мощностью N без повторений определяется аналитическим выражением для вычисления биноминального коэффициента [5]

$$C_m^N = \frac{N!}{m!(N-m)!}. \tag{21}$$

В силу того, что выбор опорного датчика оказывает влияние на форму рабочих областей разностно-дальномерных систем в пространстве [1] и точность определения местоположения в зоне МРО, порядок расположения элементов в искомых множествах $S_{n\{m\}}$ является значимым для решения данной задачи. Пусть опорным датчиком является первый элемент каждого множества $S_{n\{m\}}$. Тогда каждое из C_m^N неупорядоченных множеств $S_{n\{m\}}$ может быть упорядочено путем циклического сдвига его элементов влево.

Так, например, *n*-ю *m*-элементную комбинацию датчиков из множества $W_{\{N\}}$ можно представить в виде

$$S_n = \left\{s_{n,k}^{(1)}, s_{n,l}^{(2)}, \dots, s_{n,r}^{(m-1)}, s_{n,p}^{(m)}\right\}_{k,l,p,r \in B}, \tag{22}$$

где $B = \{1,2,3,\dots,N\}$ – множество порядковых номеров датчиков; k, l, p, r – произвольные элементы этого множества, соответствующие *n*-й комбинации датчиков, причем $k \neq l \neq p \neq r$.

Упорядочивая элементы путем сдвига влево, можно получить следующую совокупность подмножеств:

$$S_{n,1} = \left\{s_{n,k}^{(1)}, s_{n,l}^{(2)}, \dots, s_{n,r}^{(m-1)}, s_{n,p}^{(m)}\right\}_{k,l,p,r \in B};$$

$$S_{n,2} = \left\{s_{n,l}^{(2)}, \dots, s_{n,r}^{(m-1)}, s_{n,p}^{(m)}, s_{n,k}^{(1)}\right\}_{k,l,p,r \in B};$$

$$\vdots$$

$$S_{n,m} = \left\{s_{n,p}^{(m)}, s_{n,k}^{(1)}, s_{n,l}^{(2)}, \dots, s_{n,r}^{(m-1)}\right\}_{k,l,t,r \in B}.$$

Таким образом, с учетом упорядочивания подмножеств S_n путем сдвига их элементов количество возможных *m*-элементных комбинаций датчиков равно

$$C = m \cdot C_m^N = \frac{N!}{(m-1)!(N-m)!}. \tag{23}$$

Следовательно, имеет место множество $U_{\{C\}} = \left\{S_{n\,\{m\}}\right\}_{n=1}^{C}$ упорядоченных сдвигом влево *m*-элементных подмножеств множества $W_{\{N\}}$. Множество $U_{\{C\}}$ может быть сгенерировано двумя способами [5]:

– путем порождения в лексикографическом порядке;

– путем порождения в порядке минимального изменения на основе кодов Грея.

В соответствии с условиями разбиения множества датчиков из всех *C* элементов множества $U_{\{C\}}$ необходимо выбрать *Q* таких непересекающихся комбинаций, что $S_{l\,\{m\}} \cap S_{k\,\{m\}} = \varnothing$ при $[l = 1(1)Q], [k = 1(1)Q]$ и $l \neq k$. Можно показать, что число множеств, состоящих из *Q* непересекающихся *m*-элементных подмножеств множества $W_{\{N\}}$, определяется выражением

$$V_m^N = \frac{N!}{(m!)^Q Q!}, \; Q = \frac{N}{m}. \tag{24}$$

С учетом необходимости упорядочивания *m*-элементных подмножеств формула, которая определяет число множеств, состоящих из *Q* непересекающихся *m*-элементных подмножеств множества $W_{\{N\}}$, имеет вид

$$V = m^Q \cdot V_m^N = \frac{N!}{((m-1)!)^Q Q!}, \; Q = \frac{N}{m}. \tag{25}$$

Таким образом, имеет место множество возможных вариантов решения рассматриваемой задачи $E_{\{V\}} = \left\{E_{g\,\{Q\}}\right\}_{g=1}^{V}$, представляющее собой совокупность множеств $E_{g\,\{Q\}} = \left\{S_{n\,\{m\}}\right\}_{n=1}^{Q}$, элементами которых являются *Q* непересекающихся *m*-элементных подмножеств множества $W_{\{N\}}$. Например, *g*-я комбинация множества $E_{\{V\}}$ имеет вид

$$E_{g\{Q\}} = \left\{S_{1\{m\}}, S_{2\{m\}}, ..., S_{Q\{m\}}\right\},\ W_{\{N\}} = \bigcup_{i=1}^{Q} S_{i\{m\}},\ S_{i\{m\}} \in W_{\{N\}}, \left[g = 1(1)V\right]. \quad (26)$$

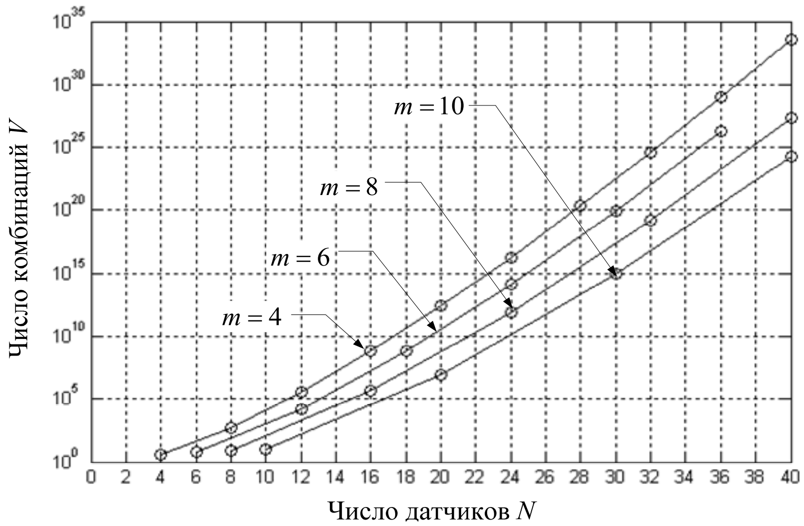


Рис. 2. Зависимости числа комбинаций V от числа датчиков N для различных значений мощности подмножеств m

Множество $E_{\{V\}}$ может быть сформировано из элементов множества $U_{\{C\}}$ с соблюдением условия отсутствия пересечений составных множеств каждого g-го элемента $E_{g\{Q\}}$ либо путем перестановок исходного множества $W_{\{N\}}$ и его разделением на Q частей после каждой перестановки.

Графики зависимостей величины V от исходного количества датчиков N для различных значений m представлены на рис. 2.

Метод субоптимального разбиения множества датчиков на разностно-дальномерные группы. Предположим, что существует некая гипотетическая детерминированная геометрическая конфигурация распределенных в объеме Θ пространства N датчиков, при которой путем разбиения множества $W_{\{N\}}$ может быть получено Q разностно-дальномерных групп, обеспечивающих наименьшие из всех V возможных вариантов значения коэффициентов геометрии в заданной зоне МРО. Такое разбиение будем называть оптимальным разбиением множества датчиков $W_{\{N\}}$ на Q разностно-дальномерных групп по критерию минимальной геометрической погрешности в заданной зоне МРО.

В том случае, когда распределение датчиков в объеме Θ пространства подвержено воздействию случайных факторов, вероятность того, что N датчиков сформируют вышеупомянутую гипотетическую конфигурацию, мала. В таких условиях разбиение множества $W_{\{N\}}$ не может быть оптимальным. В силу этого разбиение множества из N случайно распределенных в объеме Θ пространства датчиков на Q разностно-дальномерных групп по критерию минимального коэффициента геометрии в заданной зоне МРО будем называть субоптимальным.

Пусть каждому n-му элементу множества $U_{\{C\}}$ соответствует вычисленный заранее максимальный коэффициент геометрии в зоне МРО $k_{\mathrm{m}}^{(n)}$, т.е. имеет место множество $K_{m\{C\}} = \left\{k_{\mathrm{m}}^{(n)}\right\}_{n=1}^{C}$.

Каждому g-му элементу множества $E_{\{V\}}$ приведем в соответствие значение $k_{\mathrm{mm}}^{(g)}$, равное максимальному из всех значений $k_{\mathrm{m}}^{(n)}$, соответствующих составным элементам множества $E_{g\{Q\}} = \left\{S_{n\{m\}}\right\}_{n=1}^{Q}$, т.е. имеет место множество $K_{\mathrm{mm}\{V\}} = \left\{k_{\mathrm{mm}}^{(q)}\right\}_{q=1}^{V}$, где $k_{\mathrm{mm}}^{(g)} = \max\left(\left\{k_{\mathrm{m}}^{(1)}, k_{\mathrm{m}}^{(2)}, ..., k_{\mathrm{m}}^{(Q)}\right\}_{g}\right)$.

Тогда в качестве меры целевого эффекта, достигаемого субоптимальным разбиением множества датчиков на разностно-дальномерные группы, будем считать показатель $k_{\mathrm{mm}}^{(g)}$. Значение показателя $k_{\mathrm{mm}}^{(g)}$ должно быть минимальным среди элементов множества $K_{\mathrm{mm}\{V\}}$ при наилучшей геометрической конфигурации групп датчиков, соответствующих g-му элементу множества $E_{\{V\}}$.

Опираясь на вышеизложенное, можно синтезировать метод субоптимального разбиения множества датчиков на разностно-дальномерные группы, позволяющий найти m-элементные непересекающиеся комбинации множества датчиков с наилучшей геометрической конфигурацией. Основные этапы метода состоят в следующем (рис. 3):

– формирование множества $U_{\{C\}} = \left\{S_{n\{m\}}\right\}_{n=1}^{C}$ упорядоченных циклическим сдвигом m-элементных подмножеств множества $W_{\{N\}}$ датчиков;

– вычисление максимальных коэффициентов геометрии в зоне МРО $k_{\text{m}}^{(n)}$ для всех C элементов множества $U_{\{C\}}$: $K_{m\{C\}} = \left\{k_{\text{m}}^{(n)}\right\}_{n=1}^{C}$;

Рис. 3. Основные этапы метода субоптимального разбиения множества из N датчиков на Q разностно-дальномерных групп

– формирование множества $E_{\{V\}}$, $E_{g\{Q\}} = \left\{S_{n\,\{m\}}\right\}_{n=1}^{Q}$, $\left[g = 1(1)V\right]$, элементами которого являются совокупности из Q непересекающихся m-элементных подмножеств исходного множества порядковых номеров датчиков;

– вычисление максимального из всех максимальных коэффициентов геометрии в зоне МРО для каждого g-го элемента множества $E_{\{V\}}$: $K_{\text{mm}\{V\}} = \left\{k_{\text{mm}}^{(q)}\right\}_{q=1}^{V}$, где $k_{\text{mm}}^{(g)} = \max\left(\left\{k_{\text{m}}^{(1)}, k_{\text{m}}^{(2)}, \ldots, k_{\text{m}}^{(Q)}\right\}_g\right)$;

– отыскание порядкового номера w в множестве $K_{\mathrm{mm}\{V\}} = \left\{k_{\mathrm{mm}}^{(q)}\right\}_{q=1}^{V}$, соответствующего минимальному из всех элементов множества $K_{\mathrm{mm}\{V\}}$ значению.

Полученный на последнем этапе порядковый номер w позволяет определить искомую комбинацию $E_{w\{Q\}}$ множества $E_{\{V\}}$, Q элементов которой имеют наилучшую геометрическую конфигурацию по критерию минимальной погрешности ОМП ИРИ в зоне МРО.

Предложенный метод позволяет наилучшим образом разбить множество датчиков $W_{\{N\}}$ на Q m-элементных непересекающихся подмножеств в смысле наилучшей геометрической конфигурации, т.е. получить на выходе множество $E_{w\{Q\}} \subseteq E_{\{V\}}$, которому соответствует минимальное значение $k_{\mathrm{mm}}^{(w)}$ из всех элементов множества $K_{\mathrm{mm}\{V\}}$.

Следует отметить, что мощность множества $E_{\{V\}}$, как видно на рис. 2, даже при небольших значениях N и m имеет большие значения, что свидетельствует о значительных временных и вычислительных затратах, требуемых для реализации данного алгоритма. В силу этого существует необходимость разработки методов разбиения множества датчиков на разностно-дальномерные группы, близких по целевому эффекту к субоптимальному, но реализуемых в режиме реального времени.

В силу этого, приведенный вариант реализации процедуры субоптимального разбиения множества датчиков на разностно-дальномерные группы может быть использован в качестве эталонного по целевому эффекту при разработке других менее ресурсоемких методов.

Заключение. Таким образом, на основе представленного аналитического выражения для коэффициента геометрии, определяющего степень влияния геометрической конфигурации разностно-дальномерной сети на погрешность определения местоположения, исследованы комбинаторные аспекты разбиения множества распределенных в пространстве датчиков на группы определения местоположения источников радиоизлучений в прямоугольной зоне мониторинга радиообстановки. Предложен метод субоптимального разбиения множества распределенных в пространстве датчиков на группы определения местоположения разностно-дальномерным методом по критерию минимальной погрешности определения координат в зоне оперативного мониторинга радиообстановки, который может быть использован в качестве эталонного по целевому эффекту при разработке других менее ресурсоемких методов.

Литература

1. Кондратьев В.С. Многопозиционные радиотехнические системы / В.С. Кондратьев, А.Ф. Котов, Л.Н. Марков. – М.: Радио и связь, 1986. – 264 с.

2. Глобальная спутниковая радионавигационная система ГЛОНАСС / под ред. В.Н. Харисова, А.И. Перова, В.А. Болдина. – М.: ИПРЖР, 1998. – 400 с.

3. Яценков В.С. Основы спутниковой навигации. Системы навигации GPS NAVSTAR и ГЛОНАСС. – М.: Горячая линия-Телеком, 2005. – 272 с.

4. Кремер Н.Ш. Теория вероятностей и математическая статистика: учеб. для вузов. – М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2004. – 573 с.

5. Рейнгольд Э. Комбинаторные алгоритмы. Теория и практика / Э. Рейнгольд, Ю. Нивер-гельт, Н. Део. – М.: Мир, 1980. – 476 с.

Лопатин Евгений Александрович
Канд. техн. наук, ведущий специалист ОАО «Современная сотовая связь», г. Москва
Тел.: 8 (812) 352-67-99
Эл. почта: e_lopatin@inbox.ru

Семенюк Сергей Сергеевич
Ведущий специалист ОАО «Современная сотовая связь»
Тел.: 8 (812) 3-52-67-99
Эл. почта: sergio_ss@bk.ru

Lopatin E.A., Semenyuk S.S.

Method of set partition of spaced sensors into range-difference measuring groups for radio-frequency source location during operational monitoring of the radio situation

This article presents the results of the research of combinatorial and algorithmic aspects of set partition of spaced sensors into groups for radio-frequency source location by range-difference measuring method during operational radio situation monitoring. We offer the method of set partition of spaced sensors into range-difference measuring groups for radio-frequency source location by criterion of minimum position fix errors in monitoring coverage.

Keywords: sensors set, set partition, range-difference measuring method, radio situation monitoring.