

УДК 355/359

**О.Н. НЕПЛЮЕВ**, кандидат  
технических наук, доцент

## **МЕТОД УПРАВЛЕНИЯ ПРОСТРАНСТВЕННО-РАСПРЕДЕЛЕННЫМ КОМПЛЕКСОМ РАДИОЭЛЕКТРОННОГО ПОДАВЛЕНИЯ**

*Предлагается метод решения задачи назначения целей пространственно-распределенному комплексу РЭП, учитывающий как особенности его построения и функционирования, так и особенности совместных действий входящих в него средств.*

*Ключевые слова: пространственно-распределенный комплекс РЭП; многолучевая станция помех; назначение целей; сектор одновременной работы; радиоэлектронное подавление.*

Развитие технологий по построению твердотельных активных фазированных антенных решеток (АФАР) обеспечивает возможность одновременного излучения сигнала в нескольких направлениях и управление его мощностью в каждом из них [1]. Это позволяет создавать пространственно-распределенные комплексы помех (ПРКП), состоящие из нескольких многолучевых станций помех (МСП), объединенных линиями связи [2; 3].

Задачу управления ПРКП необходимо решать с учетом дифференцированного выделения энергопотенциала на каждую из обслуживаемых целей каждой МСП из состава ПРКП. В методе [4] этот учет отсутствует, так как энергопотенциал, назначенный для подавления каждого объекта из числа выбранных, определяется числом направлений подавления и характеристиками парциальных диаграмм направленности антенны (ДНА) в соответствии с возможностями диаграммо-образующей схемы передающего канала МСП. Данный факт не позволяет достичь максимума эффективности ПРКП при реализации дифференцированного управления энергопотенциалом МСП.

Цель работы – разработать метод управления ПРКП, обеспечивающий максимум эффективности ПРКП с учетом дифференциального выделения энергопотенциала на обслуживаемые цели МСП из его состава.

По аналогии с [4], показатель эффективности ПРКП – математическое ожидание (МОЖ) числа подавленных целей, взвешенных по важности, определяется выражением:

$$\mathcal{E}(X, Q, A) = \sum_{i=1}^N C_i P_i (P_{ni}^{TP}, \sum_{j=1}^J P_{ni}^j (Q_j^{COP}, \alpha_{ij}) x_{ij}), \quad (1)$$

где  $N$  – число объектов подавления (целей) в зоне ответственности ПРКП;  $i = \overline{1, N}$ ;  $J$  – число МСП в составе ПРКП,  $j = \overline{1, J}$ ;  $X$  – матрица назначения целей ПРКП,  $x_{ij} \in X$ ;  $Q$  – массив параметров, характеризующих направления биссектрис СОР МСП в пространстве,  $Q_j^{COP} \in Q$ ;  $A$  – массив параметров, характеризующих дифференцированное распределение энергопотенциала МСП по целям,  $\alpha_{ij} \in A$ ;  $x_{ij}$  – параметр распределения, который отражает факт назначения  $i$ -ой цели  $j$ -ой МСП ( $x_{ij} = 1$  если  $i$ -я цель назначена  $j$ -ой МСП,  $x_{ij} = 0$  – если иначе);  $Q_j^{COP}$  – параметры, характеризующие направление биссектрисы СОР  $j$ -ой МСП в пространстве;  $\alpha_{ij} \in [0, 1]$  – коэффициент, характеризующий долю энергопотенциала  $i$ -й МСП выделяемую для подавления  $j$ -й цели;  $C_i \in [0, 1]$  – важность  $i$ -ой цели;  $P_i$  – вероятность выполнения требований по подавлению  $i$ -ой цели ПРКП;  $P_{ni}^{TP}$  – требуемая мощность помех на входе приемного устройства подавляемого  $i$ -го РЭС, обеспечивающая его подавление с заданным качеством;  $P_{ni}^j$  – мощность помех на входе приемного устройства  $i$ -го РЭС, создаваемых  $j$ -ой МСП.

Соответственно задачу управления ПРКП можно представить в следующей формальной постановке:

$$\langle X^*, Q^*, A^* \rangle = \underset{X, Q, A}{argmax} \mathcal{E}(X, Q, A), \quad (2)$$

при ограничениях на пространственные и энергетические возможности МСП из состава ПРКП по подавлению:

1. Подавляемые цели должны находиться в парциальных лучах МСП, составляющих СОР. Пусть:

$$Y_{i,j,l} = \begin{cases} 1, & \text{если } i\text{-я цель находится в } l\text{-м луче } j\text{-ой МСП, } |Q_{cij} - Q_{ljl}| \leq \frac{\varphi_{ljl}}{2}, \\ 0 & \text{в противном случае,} \end{cases} \quad (3)$$

где  $l = \overline{1, L_j}$  ( $L_j$  – число лучей подавления  $j$ -ой МСП);  $\varphi_{ljl}$  – ширина ПДН  $l$ -го луча подавления  $j$ -ой МСП;  $Q_{ljl}$  – параметры, характеризующие пространственное положение биссектрисы  $l$ -го луча подавления  $j$ -ой МСП;  $Q_{cij}$  – параметры, характеризующие пространственное направление на  $i$ -ю цель относительно пространственного положения  $j$ -ой МСП.

Тогда формально данное ограничение можно представить как:

$$x_{ij} = 0, \forall Y_{i,j,l} = 0. \quad (4)$$

2. В одном луче подавления  $j$ -ой МСП совместно может подавляться не более  $H_j^{rz}$  целей с одинаковым режимом работы РЭС  $rz$  ( $rz = \overline{1, R}$ ,  $R$  – число режимов работы РЭС по всем их типам).

Пусть  $\Delta_i^{rz} = 1$ , если режим работы  $i$ -ой РЭС  $r_i = rz$ , и  $\Delta_i^{rz} = 0$  в противном случае. Тогда:

$$\sum_{i=1}^N Y_{i,j,l} \Delta_i^{rz} x_{i,j} \leq H_j^{rz}, \forall l = \overline{1, L_j}, rz = \overline{1, R}. \quad (5)$$

3. Подавление одной цели  $j$ -ой МСП должно осуществляться не более чем одним лучом подавления:

$$\sum_{l=1}^{L_j} Y_{i,j,l} x_{i,j} \leq 1, \forall i = \overline{1, N}. \quad (6)$$

4. Подавление нескольких целей  $j$ -ой МСП может осуществляться не более чем  $S_j$  лучами подавления. Пусть:

$$M_{jl} = \begin{cases} 1, & \text{если } \sum_{i=1}^N Y_{i,j,l} x_{i,j} > 0, \\ 0, & \text{если иначе.} \end{cases} \quad (7)$$

Тогда:

$$\sum_{l=1}^{L_j} M_{jl} \leq S_j. \quad (8)$$

5. Назначенные  $j$ -ой МСП цели должны принадлежать по пространству её зоне ответственности:

$$x_{i,j} = 0, \text{ если } \mathbf{W}_{\text{ци}}^{\alpha j} \notin Z_j, \forall i = \overline{1, N}, \quad (9)$$

где  $Z_j$  – параметры, определяющие зону ответственности  $j$ -ой МСП в пространстве,  $\mathbf{W}_{\text{ци}}^{\alpha j}$  – экстраполированные на время задержки постановки помех  $j$ -ой МСП пространственные координаты  $i$ -ой цели.

6. Энергопотенциал, выделяемый  $j$ -ой МСП на подавляемые цели в одном луче подавления одинаков. Энергопотенциал, выделяемый  $j$ -ой МСП по всем лучам, не должен превышать её возможностей и быть распределен полностью:

$$\alpha_{ij} = \alpha_{lj}, \forall Y_{i,j,l} \neq 0, \sum_{l=1}^{L_j} \alpha_{lj} = 1. \quad (10)$$

Задача (2-10) является задачей математического программирования со смешанными переменными (матрица назначения  $X$  целочисленна, а параметры пространственного положения  $Q$  и распределения энергопотенциала  $A$  – непрерывные величины). Ряд точных

и приближенных математических методов решения этого класса задач, приведен в [5-7]. Однако из-за большой размерности данной задачи их использование нецелесообразно, так как может потребовать значительных вычислительных ресурсов. Поэтому, в данном случае, наиболее предпочтительно применять приближенные методы, использующие для решения задачи её специфику [5; 7]. Рассмотрим один из таких методов.

Его основная идея, позволяющая существенно снизить комбинаторику исходной задачи, заключается в формировании совокупности целей («пучков целей»), лежащих в пространстве относительно МСП из состава ПРКП в пределах её парциальных диаграмм направленности. Другой отличительной особенностью этого метода является использование для решения задачи (2-10) модифицированного метода максимального элемента, при реализации которого на каждом шаге процесса решения единичное приращение дается той переменной, которая обеспечивает максимальное приращение целевой функции в данной точке. Из существа метода следует необходимость определения прироста целевой функции (1) от произведенного назначения. В соответствии с (1) пусть:

$$U_i^j(Q_i^{\text{COP}j}, \alpha_{ij}) = C_i P_i(P_{\text{п}i}^{\text{тпр}}, P_{\text{п}i}^j(Q_i^{\text{COP}j}, \alpha_{ij}), P_{\text{п}i}^{\text{наз}}), \quad (11)$$

где  $P_{\text{п}i}^{\text{наз}}$  – мощность помех на входе приемного устройства  $i$ -го РЭС, создаваемых другими (не  $j$ -ой) МСП из состава ПРКП за счет предыдущих их назначений на  $i$ -ю цель.

В соответствии с [4] значение вероятности выполнения требования по подавлению  $i$ -й цели  $j$ -ой МСП из состава ПРКП  $P_i$  может определяться следующим выражением:

$$P_i = \lambda^r(P_{\text{п}i}^{\text{тпр}}, P_{\text{п}i}^j(Q_i^{\text{COP}j}, \alpha_{ij}) + P_{\text{п}i}^{\text{наз}}) - \lambda^r(P_{\text{п}i}^{\text{тпр}}, P_{\text{п}i}^{\text{наз}}), \quad (12)$$

где  $\lambda^r$  – функция принадлежности нечеткого множества требований к подавлению МСП цели в соответствии с режимом её работы  $r$  ( $\lambda^r \in [0; 1]$ ).

При реализации первого шага решения задачи  $P_{\text{п}i}^{\text{наз}} = 0$  и (12) примет вид, аналогичный приведенному в [4]. Таким образом, выражение (12) определяет прирост вероятности выполнения требований по подавлению  $i$ -ой цели при назначении на неё  $j$ -ой МСП и, как следствие, определяет соответствующий прирост целевой функции (1).

В соответствии с ограничением (5) в одном луче подавления  $j$ -ой МСП может подавляться не более  $H_j^{rz}$  целей с одинаковым режимом работы РЭС  $rz$ .

Пусть  $\Delta_{ik}^j$  элемент матрицы взаимного положения  $i$ -ой и  $k$ -ой целей в пространстве относительно луча подавления  $j$ -ой МСП. Матрица  $\Delta_{ik}^j$  квадратная симметричная с нулевой главной диагональю, единичные элементы которой отражают факт пространственного попадания в луч подавления МСП целей с одинаковым режимом работы РЭС:

$$\Delta_{ik}^j = 0, \text{ если } r_i \neq r_k \forall i, k = \overline{1, N}. \quad (13)$$

При этом количество целей (назовем их сопутствующими), лежащих совместно с  $i$ -ой (будем называть её опорной) в одном луче подавления  $j$ -ой МСП, равно:

$$A_i^j = \sum_{k=1}^N \Delta_{ik}^j. \quad (14)$$

Ограничение (5) будет выполнено если:

$$0 \leq A_i^j \leq (H_j^{r_i} - 1), \quad (15)$$

где  $r_i$  – режим работы  $i$ -го РЭС.

Тогда для случая  $A_i^j > (H_j^{r_i} - 1)$  строим последовательность:

$$\eta_i^j = (U_1^j \dots U_k^j), \forall \Delta_{ik}^j = 1, k = \overline{1, N}, \quad (16)$$

которую сортируем по убыванию элементов, т.е. получаем новую последовательность:

$$\eta_i^{\text{сорт}j} = (U_{V_1}^j \dots U_{V_h}^j), \forall U_{V_h}^j \geq U_{V_{h+1}}^j, h = \overline{1, N}, h \neq i. \quad (17)$$

Для дальнейшего рассмотрения интересны только  $H_j^{r_i} - 1$  первых элементов последовательности (17), так как именно они могут обеспечить наибольший прирост целевой функции при выполнении ограничения (15). Поэтому скорректируем значения элементов  $\Delta_{ik}^j$  следующим образом:

$$\Delta_{ik}^j = 0, \forall k \notin (V_1 \dots V_{H_j^{r_i} - 1}). \quad (18)$$

В итоге прирост значения целевой функции (1) при назначении  $j$ -ой МСП одного направления подавления и выборе в качестве опорной по этому направлению  $i$ -ой цели определяется выражением:

$$F_i^{1j}(Q_i^{\text{COP}j}) = U_i^j(Q_i^{\text{COP}j}) + \sum_{k=1}^N U_k^j(Q_i^{\text{COP}j}) \Delta_{ik}^j, \quad (19)$$

т.е. равен сумме приростов целевой функции за счет подавления  $i$ -ой опорной и сопутствующих ей целей. В связи с тем, что  $j$ -ой МСП назначено одно направление подавления ( $l = 1$ )  $\alpha_{lj} = \alpha_{ij} = 1$  для  $i$ -ой опорной и сопутствующих ей целей.

Для определения прироста значения целевой функции при назначении  $j$ -ой МСП двух направлений подавления и выборе в качестве опорных по каждому из направлений  $i$ -ой и  $m$ -ой опорной цели соответственно можно воспользоваться выражением:

$$F_{im}^{2j}(Q_{im}^{*2COPj}) = \max_{\substack{i,m=1\dots N \\ Q_{im}^{2COPj} \in Q_{im}^{допj}}} ( F_i^{1j}(Q_{im}^{2COPj}) + F_m^{1j}(Q_{im}^{2COPj}) ) \Delta_{im}^{COPj}, \quad (20)$$

где  $Q_{im}^{допj}$  – область допустимых значений параметров, определяющих направление биссектрисы COP  $j$ -ой МСП  $Q_{im}^{2COPj}$ , при которых совместное подавление  $i$ -ой и  $m$ -ой опорных, а также всех сопутствующих им целей в пределах COP осуществимо;  $\Delta_{im}^{COPj}$  – элементы матрицы взаимного положения целей в пространстве относительно COP  $j$ -ой МСП. При этом:

$$\Delta_{ik}^{COPj} = 0, \forall \Delta_{ik}^{COPj} = \Delta_{ik}^j, \forall i, k = \overline{1, N}, j = \overline{1, J}. \quad (21)$$

Реализация (21) обнуляет в матрице взаимного положения целей в пространстве относительно COP МСП элементы с единичным значением, соответствующие целям, которые уже совместно лежат в лучах подавления МСП. Это исключает неоднозначность трактования значений элементов данной матрицы.

Распределение энергопотенциала МСП по каждому направлению подавления (лучу) предлагается осуществлять следующим образом:

$$\alpha_{lj} = \alpha_{ij} = \frac{P_i^\alpha}{P_i^\alpha + P_m^\alpha}, P_i^\alpha = P_{\pi i}^{тр} - P_{\pi i}^{наз}, \forall i, m = \overline{1, N}, j = \overline{1, J}, l = 1, 2, \quad (22)$$

то есть пропорционально требуемой мощности помех на входе приемных устройств  $i$ -ой и  $m$ -ой опорных целей в каждом луче подавления МСП с учетом мощности помех, создаваемых ПРКП за счет предыдущих назначений.

Элементы (19) и (20) образуют соответствующие матрицы **F1** и **F2**, отражающие прирост значения целевой функции при назначении МСП одного или двух направлений подавления.

Аналогично (20) определяется прирост значения целевой функции при назначении МСП произвольного числа направлений подавления  $S$  с образованием матрицы  $\mathbf{FS}$ . Распределение энергопотенциала МСП при этом:

$$\alpha_{lj} = \frac{P_l^\alpha}{\sum_i^S P_l^\alpha}, \forall i = \overline{1, N}, j = \overline{1, J}, l = \overline{1, S}, S \leq L_j. \quad (23)$$

Далее из всех значений элементов матриц  $\mathbf{F1}, \mathbf{F2}, \dots, \mathbf{FS}$  отыскивается максимальный, а элементам  $\mathbf{X}, \mathbf{Q}, \mathbf{A}$  и  $P_n^{\text{наз}}$  (матрице мощностей помехи, создаваемых МСП на входе приемного устройства подавляемого РЭС) присваиваются соответствующие значения. Кроме того, после осуществления описанных выше назначений и присвоений параметров, соответствующие им значения элементов матриц  $\mathbf{F1}, \mathbf{F2}, \dots, \mathbf{FS}$  приравниваются нулю. После этого проверяется, всем ли МСП из состава ПРКП произведено назначение целей, т.е. выполнение условия:

$$N_{\text{наз}} \leq J. \quad (24)$$

Если условие (24) выполняется, то для МСП, которым не назначены цели (т.е. для всех  $j \notin J_{\text{наз}}$ ), осуществляется пересчет значений элементов матриц  $\mathbf{F1}, \mathbf{F2}, \dots, \mathbf{FS}$  для учета произведенных назначений. При этом учитывается суммарная мощность помех на входе приемного устройства  $i$ -го РЭС, создаваемых МСП за счет предыдущих их назначений на  $i$ -ю цель:

$$P_{\text{п}i}^{\text{наз}} = \sum_{j=1}^J P_{\text{п}i}^{\text{наз}j}. \quad (25)$$

Из пересчитанных таким образом значений элементов матриц  $\mathbf{F1}, \mathbf{F2}, \dots, \mathbf{FS}$  вновь отыскивается максимальный и т.д. до тех пор, пока выполняется условие (24).

Если условие (24) перестало выполняться, то назначение целей произведено для всех МСП из состава ПРКП и задача решена. В результате этого получены искомые матрица назначения целей  $\mathbf{X}^*$ , массив параметров, характеризующих направления биссектрис СОР МСП в пространстве,  $\mathbf{Q}^*$  и массив параметров, характеризующих дифференцированное распределение энергопотенциала МСП по целям,  $\mathbf{A}^*$ .

Значение целевой функции определяется суммой вкладов в её значение каждой из МСП  $\Theta = \sum_{j=1}^J \Delta \Theta_j$ .

Результаты оценки эффективности применения ПРКП показывают, что реализация описанного метода управления ПРКП по сравнению с [4] может обеспечить прирост его эффективности по показателю (1) в среднем до 23%.

#### Список использованных источников

1. Активные фазированные антенные решетки / Под ред. Д.И. Воскресенского, А.И. Канащенкова. М.: Радиотехника, 2004. – 488 с.
2. Современная радиоэлектронная борьба. Вопросы методологии / Под ред. В.Г. Радзиевского. М.: Радиотехника, 2006. – 424 с.
3. Палий А.И. Радиоэлектронная борьба. М.: Воениздат, 1989. – 350 с.
4. Неплюев О.Н. Метод назначения целей группе станций помех // Радиотехника (Журнал в журнале). 2015. №3. – С. 70-74.
5. Сергиенко И.В., Лебедева Т.Т., Рощин В.А. Приближенные методы решения дискретных задач оптимизации. Киев: Наук. думка, 1980. – 275 с.
6. Виноградская Т.М., Макаров И.М., Рубчинский А.А., Соколов В.Б. Теория выбора и принятия решений. М.: Наука, Главная редакция физико-математической литературы, 1982. – 328 с.
7. Алашеев М.А., Вакуленко А.А., Лясковский В.Л., Неплюев О.Н., Пильщиков Д.Е., Тикменов В.Н. Методика выбора состава задач и комплексов средств автоматизации для многоуровневой системы управления РЭС // Радиотехника (Журнал в журнале), 2004, №5. – С. 17-20.