

УДК 519.85+629.78

Методика планирования применения средств системы спутникового радиоконтроля

Масалкин А.А.*, Колесник А.В., Проценко П.А.

*Военно-космическая академия имени А.Ф.Можайского,
ул. Ждановская, 13, Санкт-Петербург, 197198, Россия*

**e-mail: of.mas632@yandex.ru*

Статья поступила 16.06.2019

Аннотация

В статье предложен методический подход по повышению эффективности контроля космической радиоэлектронной обстановки, основанный на оптимизации планирования применения группировки радиоэлектронных средств с использованием методов математического программирования, которые широко применяются в решении прикладных задач оптимизации распределения ресурсов.

Ключевые слова: спутниковый радиоконтроль, радиоэлектронная обстановка, методы планирования.

Введение

Современные тенденции развития телекоммуникационных технологий показывают, что радиоэлектронная обстановка в околоземном космическом пространстве будет усложняться. Этому будет способствовать как значительное увеличение количественного состава орбитальной группировки и появление

многоспутниковых систем, так и освоение новых частотных диапазонов, а также развертывание программно-определяемых сетей [1].

В настоящее время в околоземном космическом пространстве функционируют более 700 космических аппаратов (КА) различной государственной принадлежности. При этом запланировано развертывание крупных систем на базе мини-, микро-КА связи большого количественного состава (например, орбитальная группировка OneWeb будет включать 720 КА) [2]. Вместе с этим известны факты скрытого размещения аппаратуры связи на космических аппаратах иного целевого назначения различной государственной принадлежности, а также запуска неизлучающих «бумажных» спутников.

Данные факторы обуславливают повышение эффективности мониторинга радиоэлектронной обстановки, в том числе предъявляют все более высокие требования к составу и характеристикам средств радиоконтроля и системы управления ими.

Существующая российская наземная сеть системы контроля за излучениями радиоэлектронных средств, включающая средства различной ведомственной принадлежности (ГКРЧ, МО РФ, ФСБ и другие организации), имеет ограниченные возможности по обеспечению полноты и непрерывности радиоэлектронного контроля, в том числе при решении следующих основных задач:

– проведение измерений параметров излучений радиоэлектронных средств (РЭС) спутниковых служб радиосвязи различного назначения и оценка их

соответствия нормам, установленным решениями о выделении спектра радиочастот, либо разрешениями на использование радиочастот или радиочастотных каналов;

–осуществление спутникового радиоконтроля в целях обеспечения международно-правовой защиты скоординированного частотного ресурса (частотно-поляризационных планов) и выполнения международных соглашений;

–поиск и определение местоположения источников радиопомех по заявкам администраций связи, в том числе иностранных государств, российских операторов спутниковой связи и вещания и пользователей частотного ресурса;

–выявление российских и зарубежных космических аппаратов связи и вещания, не санкционированно использующих частотный ресурс.

В условиях увеличения количественного состава объектов и средств радиоконтроля, освоения новых диапазонов и структур сигналов, в настоящее время нерешенной остается задача оптимального планирования применения средств радиоконтроля (СрРК) относительно их территориальной доступности и ведомственной принадлежности.

Например, в системе радиоконтроля ГКРЧ при планировании работы СрРК применяется гибкий подход, предусматривающий большой охват территорий с высокой плотностью населения и меньший – территорий с низкой плотностью населения (сельская местность).

В Минобороны применяется подход, реализуемый способом последовательного одиночного контроля определенных радиочастотных диапазонов заблаговременно назначенных космических аппаратов связи. Показателем

эффективности такого подхода является количество частот и каналов, подвергшихся радионаблюдению.

Кроме того, указанные подходы не учитывают плотность расположения КА на геостационарной орбите и возможность одновременного радиомониторинга ретрансляторов одного КА несколькими СтРК. В связи с этим разработка новых подходов и методов, направленных на разрешение данных сложностей представляется актуальной и востребованной задачей.

На рисунке 1 приведены типовые варианты радиоконтроля орбитальной группировки КА связи на геостационарной орбите. При этом возможен вариант, при котором одна орбитальная группировка КА будет контролироваться несколькими СтРК, в том числе различной ведомственной принадлежности по несогласованным показателям эффективности.

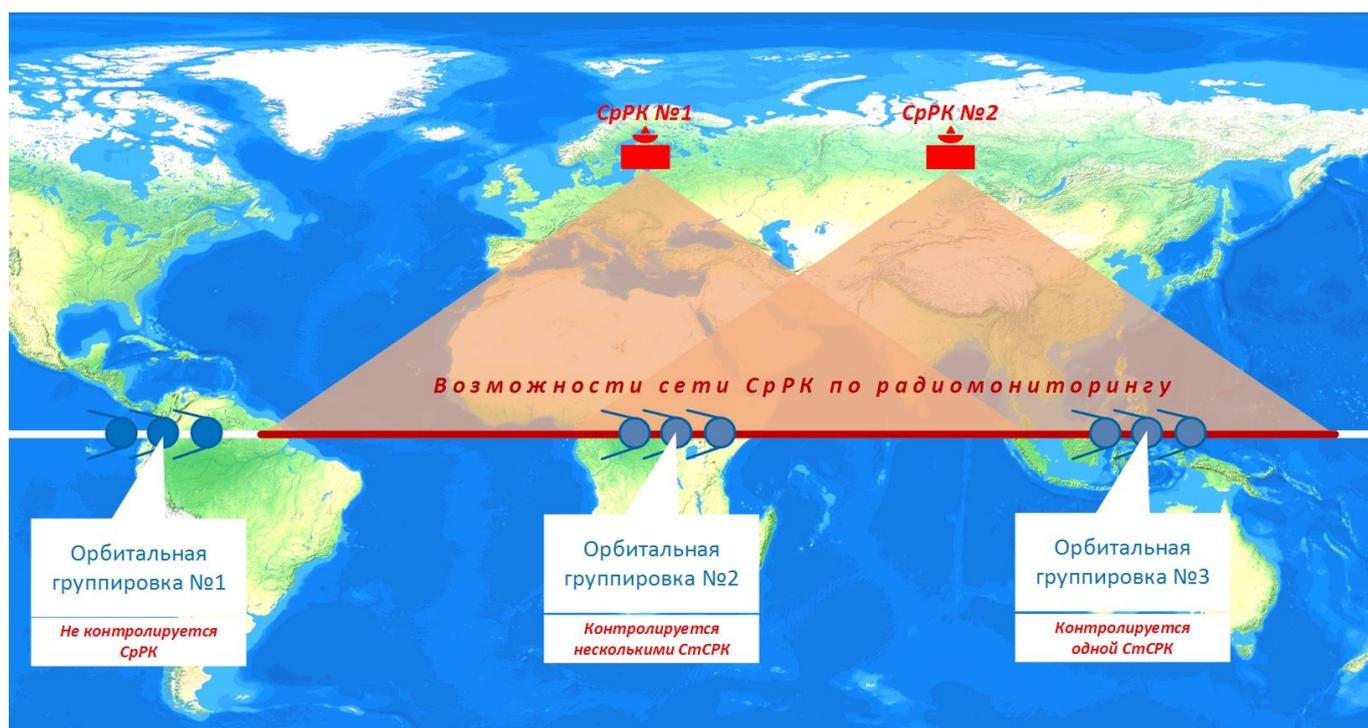


Рисунок 1 – Варианты радиоконтроля орбитальной группировки КА связи

Также, следует отметить, что нахождение КА связи в зоне радиоконтроля СрРК не гарантирует получение информации о всех каналах спутниковой связи данного КА. Например, при взаимном расположении абонентов спутниковой связи и СрРК, представленном на рисунке 2, контроль канала передачи информации от КА к абоненту № 1 возможен по боковому лепестку диаграммы направленности КА связи, а контроль канала абонента №2 невозможен.

Это объясняется тем, что ширина главного лепестка диаграммы направленности при передаче информации по каналу «космос-Земля» составляет десятые доли градуса, что не позволяет контролировать радиоканалы абонентов, находящихся на достаточном удалении от станций радиоконтроля (порядка 1000-1500 км) [3-5].

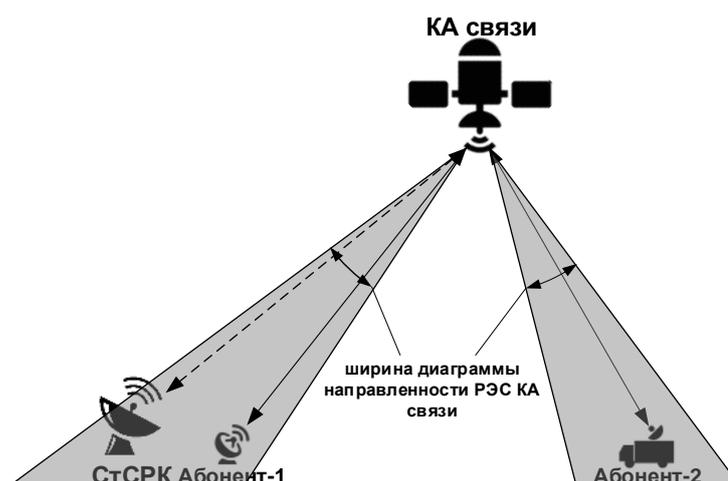


Рисунок 2 – Радиоконтроль абонентов спутниковой системы связи

В связи с этим представляется целесообразным использование двух и более территориально разнесенных средств на один КА связи для увеличения количества контролируемых каналов [6]. Однако существующие подходы к планированию задействования СрРК [6-8] предполагают использование комбинаторно-эвристических методов [9], гарантирующих получение локально оптимальных решений, а также не учитывают возможность дублирования контролируемых каналов при различных назначениях. В связи с этим возникает необходимость поиска альтернативных методов планирования применения СрРК, обеспечивающих максимально полное использование имеющегося технического ресурса средств контроля радиочастотной обстановки в интересах повышения результативности всей системы спутникового радиоконтроля. Новизна методики, рассматриваемой в данной статье, заключается в учете возможности назначения двух и более СрРК на один КА связи и учете дублирования каналов связи, что позволяет обеспечить более рациональное использование технического ресурса.

Постановка задачи

В качестве исходных данных используются:

- множество СрРК $A = \{a_i\}, i = \overline{1, I}, I$ – количество СрРК. Каждое СрРК характеризуется набором параметров $a_i = \langle \psi_i, \lambda_i, e_i \rangle, e_i = (G_i, P_i), i = \overline{1, I}$, где:

ψ_i – географическая широта расположения i -й СрРК;

λ_i – географическая долгота расположения i -й СрРК;

e_i – набор параметров аппаратуры i -й СрРК;

G_i – коэффициент усиления приемной антенны i -й СрРК;

P_i – чувствительность приемной антенны i -й СрРК;

- множество КА связи $B = \{b_j\}, j = \overline{1, J}, J$ – количество КА, каналы связи

которых подлежат радиоконтролю (поскольку данные КА находятся на геостационарной орбите, их расположение задается долготами точек стояния),

$b_j = \langle L_j^{\text{КА}}, e_j^{\text{КА}} \rangle, e_j^{\text{КА}} = (\lambda_j^{\text{КА}}, G_j^{\text{КА}}, P_j^{\text{КА}}), j = \overline{1, J}$, где:

$L_j^{\text{КА}}$ – долгота точки стояния j -го КА связи;

$e_j^{\text{КА}}$ – набор параметров бортовой аппаратуры j -го КА связи;

$\lambda_j^{\text{КА}}$ – длина несущей радиоволны, используемой для передачи

сообщения с борта j -го КА связи;

$G_j^{\text{КА}}$ – коэффициент усиления передающей антенны j -го КА связи;

$P_j^{\text{КА}}$ – мощность, излучаемая передающей антенны j -го КА связи;

- множество каналов «космос-земля» $C = \{c_k, k = \overline{1, K}\}$. Множество каналов

спутниковой связи j -го спутника обозначим как $C_j = \{c_\chi, \chi \in K_j\}$. Тогда $C = \bigcup_{j=1}^J C_j$,

$\forall j_1, j_2 \in M : C_{j_1} \cap C_{j_2} \neq \emptyset$.

Путем решения вспомогательной задачи представляется возможным построение потенциала доступности каналов связи:

$$\Phi(a_i, b_j, c_k) = A \times B \times C \rightarrow \{0, 1\}, \quad (1)$$

причем $\Phi(a_i, b_j, c_k) = 1$, если при назначении средства a_i на аппарат b_j канал c_k

считается контролируемым, и $\Phi(a_i, b_j, c_k) = 0$ – в противном случае.

Контролируемость каждого канала определяется пространственной доступностью КА связи b_j для СрРК a_i и энергетической доступностью канала связи c_k . Пространственная доступность проверяется путем расчета угла места КА b_j для станции a_i , который должен быть более 7^0 . Энергетическая доступность канала c_k оценивается мощностью энергии, приходящей на приемную антенну станции [10]:

$$P_{\text{вх}}(a_i, b_j, c_k) = \frac{P_j^{\text{КА}} G_{ji}^{\text{КА-Ст}} G_i(\lambda_j^{\text{КА}})^2}{(4\pi D_{ij})^2}, \quad (2)$$

где: $G_{ji}^{\text{КА-Ст}}$ – коэффициент усиления передающей антенны КА b_j в направлении антенны станции a_i ;

D_{ij} – расстояние между КА связи b_j и СрРК a_i .

Требуется построить план применения системы СрРК, который в общем случае можно представить как совокупность пар $\langle a_i, b_j \rangle$, соответствующих назначению СрРК a_i на КА связи b_j :

$$\Pi \subseteq A \times B = \{ \langle a_i, b_j \rangle \mid i = \overline{1, I}, j = \overline{1, J} \} \quad (3)$$

Для удобства дальнейшей формализации каждой паре $\langle a_i, b_j \rangle \in \Pi$ сопоставим некоторую булеву переменную $x_{ij} \in \{0, 1\}$. Тогда план применения системы СрРК будем описывать множеством булевых переменных $X = \{x_{ij}, i = \overline{1, N}, j = \overline{1, M}\}$, $x_{ij} \in \{0, 1\}$, при этом $x_{ij} = 1$, если средство a_i назначено на аппарат b_j , и $x_{ij} = 0$ – в противном случае.

При назначении СрРК a_i на КА b_j ($x_{ij} = 1$) контролируется некоторая совокупность (множество) каналов $C_{ij} = \{c_k, k \in K_{ij}\}, C_{ij} \subseteq C, |C_{ij}| = \text{card}(C_{ij}) = \lambda_{ij} = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K f_1(a_i, b_j, c_k)$, где: K_{ij} – множество индексов контролируемых каналов.

Тогда результативность всей системы СрРК определяется как количество контролируемых каналов в результате реализации плана применения СрРК X :

$$F(X) = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \lambda_{ij} \cdot x_{ij}, \quad (4)$$

а задачу планирования применения систему СрРК можно представить как задачу выбора:

$$X^* = \arg \max_{X \in \Delta_\beta} F(X), \quad (5)$$

- где:
- X^* – оптимальный план задействования СрРК (по количеству контролируемых каналов);
 - Δ_β – множество допустимых планов с учетом ограничений, накладываемых на процесс целевого функционирования СрРК, $\Delta_\beta = \{X | r_\beta, \beta \in B\}$;
 - r_β – ограничение, накладываемое на процесс целевого функционирования станций.

При решении задачи планирования задействования СрРК были учтены следующие ограничения, накладываемые на процесс целевого функционирования станций:

- каждое СрРК может быть назначена не более чем на один КА:

$$r_1 : \sum_{j=1}^J x_{ij} \leq 1, i = \overline{1, I}; \quad (6)$$

- СрРК назначаются только на те КА, которые находятся в их зоне ответственности:

$$r_2 : \left(1 - \operatorname{sgn} \sum_{k \in K_{ij}} \Phi(a_i, b_j, c_k) \right) \cdot x_{ij} = 0, i = \overline{1, I}, j = \overline{1, J}. \quad (7)$$

С учетом проведенных построений задача (5) относится к классу задач дискретного (булева) программирования и может быть решена либо методами дискретной оптимизации (методы переборных, направленного поиска и другие) [9, 11-13] либо с помощью В-алгоритма (алгоритма Финкельштейна) [9, 16].

Схема методики

Задача усложняется тем, что в плане задействования X существуют такие назначения $x_{i_1 j_1}, x_{i_2 j_2}$, для которых множества контролируемых каналов могут пересекаться (иметь общие элементы): $\exists i_1, i_2 = \overline{1, I}, \exists j_1, j_2 = \overline{1, J} : C_{i_1 j_1} \cap C_{i_2 j_2} = C_{i_2 j_2}^{i_1 j_1} = \{c_k, k \in K_{i_2 j_2}^{i_1 j_1}\} \neq \emptyset$. Тогда «эффект» от применения системы СрРК не равен сумме «эффектов» от применения каждого СрРК, а выражение (4) не дает точной оценки результативности плана задействования X [14].

В данном случае дальнейшее решение задачи должно основываться на проведении дополнительного анализа, выявления множества пар пересекающихся множеств $\{(C_{i_1 j_1}, C_{i_2 j_2}) \mid C_{i_1 j_1} \cap C_{i_2 j_2} \neq \emptyset, i_1, i_2 = \overline{1, I}, j_1, j_2 = \overline{1, J}\}$ и модернизации функции результативности (4) с использованием принципа включения и исключения, позволяющего оценить мощность объединения пересекающихся множеств. Для удобства дальнейшей формализации переобозначим индексы следующим образом:

$$\langle i, j \rangle \rightarrow l: l = (i-1) \cdot J + j, l = \overline{1, L}, L = I \cdot J. \quad (8)$$

Тогда модернизированную целевую функцию перепишем как:

$$F(\mathbf{X}) = \sum_{l=1}^L |C_l| \cdot x_l - \sum_{l_1=1}^L \sum_{l_2=l_1+1}^L |C_{l_1} \cap C_{l_2}| \cdot x_{l_1} \cdot x_{l_2} + \sum_{l_1=1}^L \sum_{l_2=l_1+1}^L \sum_{l_3=l_2+1}^L |C_{l_1} \cap C_{l_2} \cap C_{l_3}| \cdot x_{l_1} \cdot x_{l_2} \cdot x_{l_3} + \dots + (-1)^L |C_1 \cap C_2 \cap C_3 \cap \dots \cap C_L| \cdot x_1 \cdot x_2 \cdot x_3 \cdot \dots \cdot x_L. \quad (9)$$

Во-первых, следует отметить, что функция (9) является нелинейной, что делает невозможным применение ранее предложенных подходов и методов решения задач математического программирования для решения задачи планирования задействования СрРК. Для разрешения данной сложности предлагается способ линеаризации функции (9) с булевыми параметрами, основанный на введении дополнительных переменных [15]:

$$y_{l_1 l_2} = x_{l_1} \cdot x_{l_2} \quad (10)$$

и подстановки их в целевую функцию. При этом взаимосвязь между новой и старыми переменными описывается линейными соотношениями:

$$r_3: y_{l_1 l_2} \leq \frac{1}{2}(x_{l_1} + x_{l_2}); \quad (11)$$

$$r_4 : y_{l_1 l_2} \geq x_{l_1} + x_{l_2} - 1. \quad (12)$$

Переменные $y_{l_1 l_2}$ можно интерпретировать как групповое применение СрРК, а соотношения (11), (12), отражающие взаимосвязь между новыми и старыми переменными включаются в систему ограничений (5), (6), накладываемых на процесс функционирования средств.

Во-вторых, построение функции (9) является отдельной трудоемкой комбинаторной задачей. В связи с этим предлагается подход к решению задачи планирования задействования средств системы спутникового радиоконтроля, основанный на проведении итерационной процедуры формирования слагаемых целевой функции и уточнения ее значения. Предлагаемый подход можно представить в виде следующего алгоритма:

Шаг 1. На первой итерации $q=0$:

- формируется целевая функция в виде $F_q(\mathbf{X}) = \sum_{l=1}^L |C_l| \cdot x_l$;
- формируется множество допустимых планов $\Delta_\beta^q = \{ \mathbf{X} \mid r_\beta, \beta \in B \}$;
- формируется множество учтенных дублируемых каналов Z (на первой итерации $Z = \emptyset$);

Шаг 2. Решается задача $\mathbf{X}_q^* = \arg \max_{\mathbf{X} \in \Delta_\beta^q} F_q(\mathbf{X})$.

Шаг 3. Полученное решение \mathbf{X}_q^* проверяется на наличие неучтенных дублируемых каналов.

Если $\exists l_1, l_2 = \overline{1, L}, l_1 \neq l_2 : ((x_{l_1} \cdot x_{l_2}) = 1) \wedge (|C_{l_1} \cap C_{l_2}| > 0) \wedge (\langle l_1, l_2 \rangle \notin Z)$, то выявлены неучтенные дублируемые каналы при назначениях x_{l_1} , x_{l_2} и осуществляется переход на шаг 4. В противном случае полученное решение X_q^* есть оптимальное, счет окончен.

Шаг 4. Модернизируется:

- целевая функция $F_{q+1}(X) = F_q(X) - |C_{l_1} \cap C_{l_2}| \cdot x_{l_1} \cdot x_{l_2}$;
- множество допустимых планов $\Delta_{\beta}^{q+1} = (\Delta_{\beta}^q \cap r_3^q) \cap r_4^q$;
- $Z = Z \cup \langle l_1, l_2 \rangle$.

Переход на шаг 2.

Таким образом, слагаемые функции (9) формируются по мере необходимости учета дублирования контролируемых каналов при различных назначениях, что позволяет значительно сократить размерность решаемой задачи.

Схема методики планирования применения СРК представлена на рисунке 3.

Методика включает в себя два основных блока.

В первом блоке задаются исходные данные о составе, структуре и параметрах управляемой ССРК, группировке КА связи, а также каналах связи, подлежащих контролю. На основе исходных данных формируется множество допустимых планов применения и исходный показатель результативности, необходимой для постановки и решения задачи планирования ССРК.

Именно множество возможных вариантов задействования СтСРК обуславливает сложность решаемой задачи и необходимость разработки

специальных методов планирования, т.к. выбор (поиск) рационального плана применения ССРК с использованием методов перебора представляется нецелесообразным.

Проведенные построения позволяют во втором формализовать целевую функцию и ограничения, и представить решаемую задачу в виде задачи булевого программирования. Происходит непосредственное решение задачи планирования применения СтСРК с использованием предлагаемого алгоритма (итерационной процедуры выбора с уточнением целевой функции).

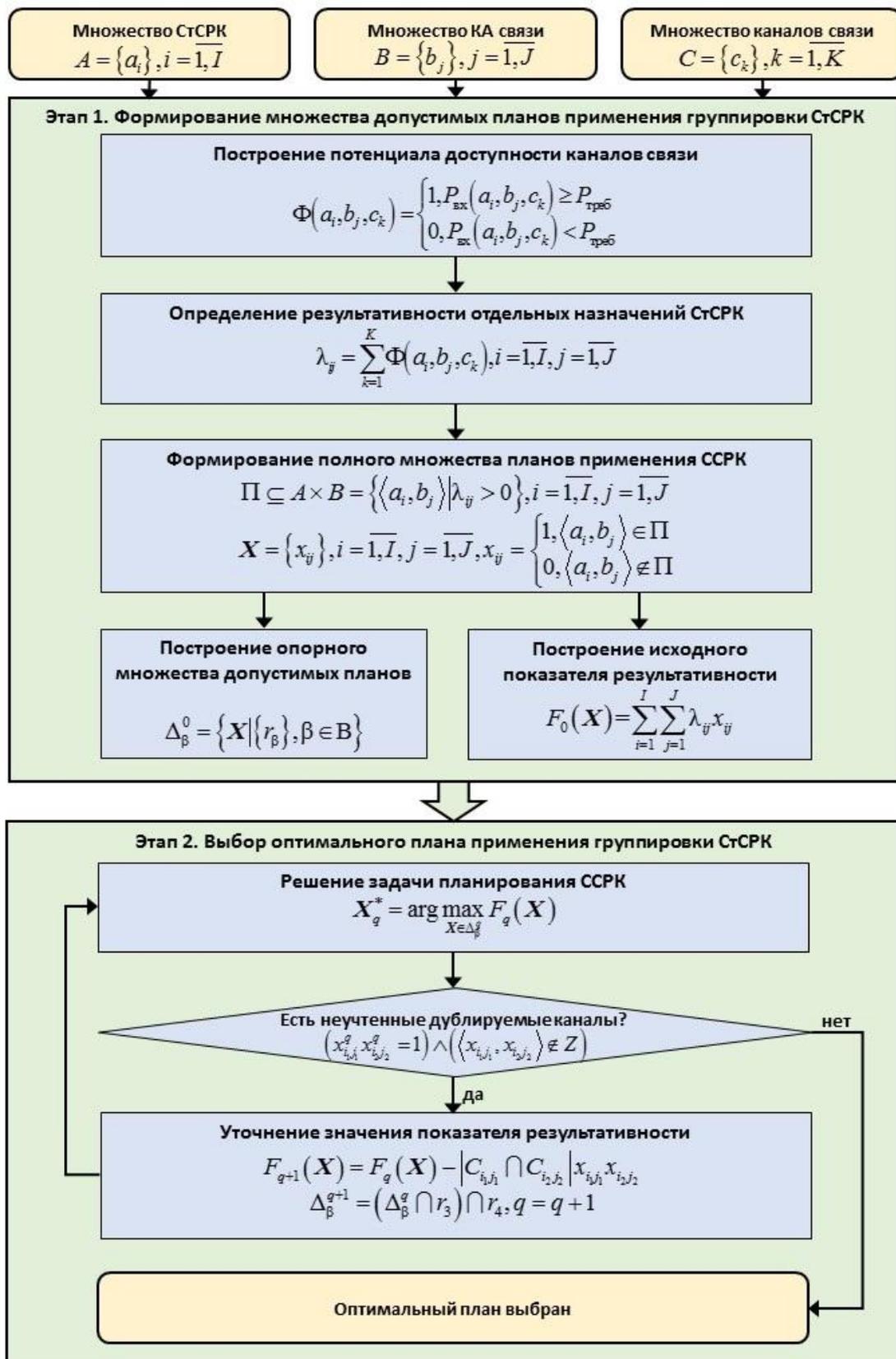


Рисунок 3– Методика планирования применения средств системы спутникового радиоконтроля

На рисунке 4 представлены результаты вычислительных экспериментов с использованием предлагаемой методики планирования СрРК.

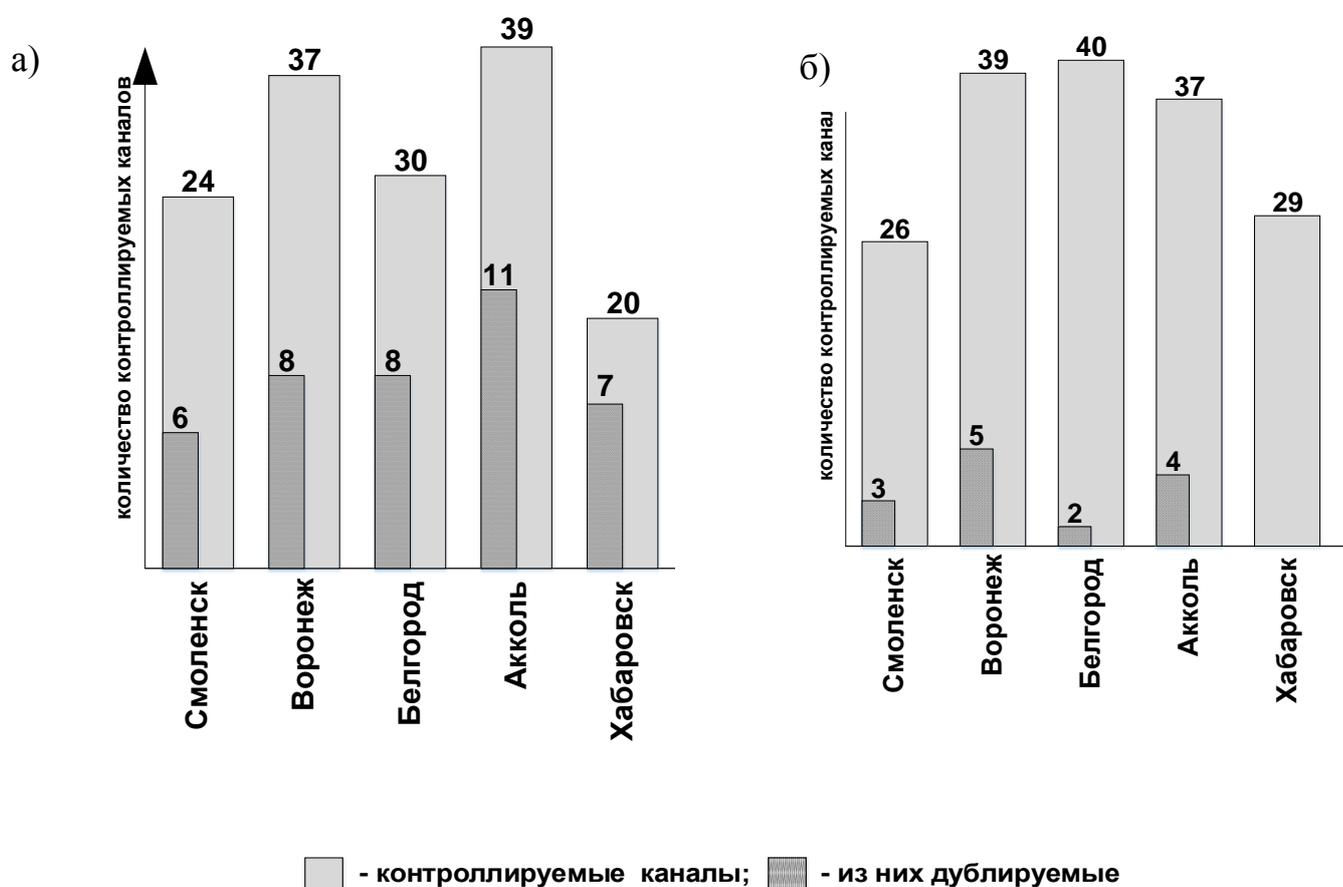


Рисунок 4 – Результаты планирования применения системы СрРК

а) без исключения дублирования контролируемых каналов;

б) с исключением дублирования контролируемых каналов

Полученные результаты [20, 21] доказывают принципиальную возможность повышения результативности применения СрРК на 15-30% за счет исключения применения нескольких СрРК по одному КА и устранения дублирования контролируемых каналов.

Заключение

Существенным отличием данной методики от остальных является возможность учета одновременного назначения двух и более пространственно

разнесенных СрРК на один КА связи и оценивание их результативности. Данный подход позволяет обеспечить более рациональное использование технического ресурса средств, что приводит, в свою очередь, к росту результативности всей системы.

Методика направлена на повышение эффективности спутникового радиоконтроля за счет рационального использования технического ресурса средств, позволяет учитывать дублирование контролируемых каналов, которое неизбежно при назначении двух и более СрРК на один и тот же КА связи, обеспечивает рациональное использование технического ресурса СрРК, что позволяет повысить результативность целевого применения системы спутникового радиоконтроля.

Библиографический список

1. О концепции развития системы контроля за излучением радиоэлектронных средств и (или) высокочастотных устройств гражданского назначения в Российской Федерации на период до 2025 года: утвержден решением Государственной комиссии по радиочастотам при Минкомсвязи Российской Федерации от 04 июля 2017 г. № 17-42-06. URL: www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/71629318/.
2. I. Portillo, B.G. Cameron, Crawley E.F. A technical comparison of three low earth orbit satellite constellation systems to provide global broadband // 69th International Astronautical Congress, 2018, Bremen, Germany. URL: <http://www.mit.edu/~portillo/files/Comparison-LEO-IAC-2018-slides.pdf>

3. Сборник «Радиоэлектронная борьба в Вооруженных Силах Российской Федерации – 2018». - М.: Информационный мост, 2018. - 135 с.
4. Ашурков И.С., Лешко Н.А., Какаев В.В. Использование метода прямого перебора для оптимизации пространственной структуры многопозиционной радиолокационной системы // Труды МАИ. 2016. № 87. URL: <http://trudy.mai.ru/published.php?ID=69752>
5. Aitmagambetov A.Z., Butuzov Ya.A., Kulakayeva A.E., Mathematical models for determining the location of radio emission sources in radiomonitoring systems on the basis on low-orbit satellites // T-Comm, 2016, vol. 10, no. 1, pp. 73 - 76.
6. Ашихмин А.В., Козьмин В.А., Негробов В.В., Пастернак Ю.Г., Рембровский Ю.А. Анализ перспективных направлений развития методов оценки угловых координат источников радиоизлучения // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2009. URL: <https://cyberleninka.ru/article/v/analiz-perspektivnyh-napravleniy-razvitiya-metodov-otsenki-uglovyh-koordinat-istochnikov-radioizlucheniya>.
7. Reception of automatic dependent surveillance broadcast via satellite and compatibility studies in the frequency band I 087.7-I 092.3 MHz. Working Document towards a Preliminary Draft New Report ITU-R M. [ADS-B], Geneva – ITU, 2015, available at: https://www.itu.int/dms_pub/itu-r/opb/rep/R-REP-M.2413-2017-PDF-E.pdf
8. Kovbasyuk S.V., Kanevsky L.B. Analysis of dependence of spacecraft movement parameters determination precision on sighting angles in multipositional monitoring

system // Radioelectronics and communication systems, 2013, vol. 56, no. 4. pp. 194 - 200.

9. Korbut A.A., Finkelstein Ju.Ju. Discrete problems in mathematical programming // Progress in mathematics, 1969, vol. 3, pp. 57 - 112.

10. Рембовский А.М., Ашихмин А.В., Козьмин В.А. Радиомониторинг: задачи, методы, средства. - М.: Горячая линия - Телеком, 2015. - 640 с.

11. Москвин Б.В. Теория принятия решений. - СПб.: ВКА имени А.Ф. Можайского, 2005. - 385 с.

12. D. Niu, B. Li. An efficient distributed algorithm for resource allocation in large-scale coupled systems // Proceedings IEEE, INFOCOM - 2013, 2013, pp. 1501 - 1509.

13. Galati M. Decomposition methods for integer linear programming. 2009 – Lehigh University. URL: <http://coral.ise.lehigh.edu/magh/pub/thesis.pdf>

14. Лешко Н.А., Ашурков И.С. Расчет рабочей зоны многопозиционной радиолокационной системы по стороннему источнику подсвета // Труды МАИ. 2015. № 83. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=62297>

15. Gaidanov D.N., Rasskazova V.A. An inference algorithm for monotone boolean functions associated with undirected graphs // Bulletin of the South Ural State University, Series: Mathematical Modelling, Programming and Computer Software, 2016, vol. 9, no. 3, pp. 17 - 30.

16. Корбут А.А., Финкельштейн Ю.Ю. Дискретное программирование. - М.: Наука, 1969. - 368 с.

17. Емельянов А.А., Малышев В.В. Смольянинов Ю.А., Старков А.В. Формализация задачи оперативного планирования целевого функционирования разнотипных космических аппаратов дистанционного зондирования Земли // Труды МАИ. 2017. № 96. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=85921>
18. Петрович Н.Т., Камнев Е.Ф., Каблукова М.В. Космическая радиосвязь. - М.: Советское радио, 1979. - 280 с.
19. Ануфриенко С.А. Введение в теорию множеств и комбинаторику. - Екатеринбург: Изд-во УрГУ, 1998. - 62 с.
20. Дрещинский В.А., Кузьмин В.Н., Чарушников А.В. Инновационный методический подход к моделированию и оцениванию эффективности космических систем // Инновации. 2015. № 9. URL: <https://maginnov.ru/ru/zhurnal/arhiv/2015/innovacii-n9-2015/>
21. Малышев В.В., Старков А.В., Федоров А.В. Методика разработки программно-моделирующего комплекса для отработки средства проведения динамических операций космический аппаратов // Труды МАИ. 2012. № 57. URL: <http://trudy.mai.ru/published.php?ID=30798>