

В.И. Карпухин, доктор технических наук,
профессор

А.Д. Луценко, доктор технических наук,
профессор

В.А. Орлов, кандидат технических наук,
доцент

Выбор конфликтно-устойчивых стратегий развития техники радиоэлектронной борьбы в динамике перевооружения сторон

Поставлена задача выбора конфликтно-устойчивых (сохраняющих требуемый уровень эффективности) в динамике перевооружения сторон стратегий (направлений) развития образцов техники (комплексов) радиоэлектронной борьбы. Решение задачи предусматривает неформальную генерацию вариантов стратегий (направлений) развития и последующий выбор оптимальной из них по критерию минимума затрат на формальной основе динамического программирования.

Одним из этапов формирования государственной программы вооружения на период до 2027 года является разработка стратегий развития системы вооружения Вооруженных Сил Российской Федерации на долгосрочную перспективу, в которых отведено место и технике радиоэлектронной борьбы (РЭБ). Непрерывное и бурное развитие радиоэлектронных компонентов в составе систем вооружения высокоразвитых стран выдвигает в качестве одного из основных системных требований к технике РЭБ при обосновании стратегий ее развития – требование конфликтной устойчивости в динамике перевооружения сторон, то есть требование поддержания эффективности на достаточном уровне в течение длительных сроков (в течение времени смены нескольких поколений радиоэлектронных средств).

Фундаментальными причинами, снижающими эффективность РЭБ с системами связи и радиолокации, являются: повышение энергетических возможностей средств, расширение рабочей полосы частот и увеличение ширины спектра сигналов, реализация оптимальной пространственно-временной обработки и создание пространственно-распределенных адаптивно реконфигурируемых наземных и воздушно-космических систем связи и радиолокации. Повышение энергетических возможностей обеспечивается увеличением времени когерентного накопления, оптимальным распределением энергии в пространстве с использованием фазированных антенных решеток, сокращением дистанций связи в мобильных сетях. Реализация пространственно-временной обработки позволит компенсировать помехи по скатам главного и боковым лепесткам диаграммы направленности антенны на 20...30 дБ. При реализации новых возможностей сохраняются все ранее использовавшиеся способы повышения помехозащищенности [1-4]. Отмеченные возможности реализуются не только в каждом новом поколении радиоэлектронных систем и средств, но и в пределах одного поколения путем последовательной модернизации. В этих условиях для того, чтобы техника РЭБ была эффективной, ее технические характеристики должны превышать минимально необходимые в текущий момент времени, способы создания, виды и параметры помех должны слабо зависеть от реализуемых в радиоэлектронных средствах способов обработки сигналов, а развитие техники РЭБ должно упреждать прогнозируемое развитие радиоэлектронных средств и систем противника. То есть техника РЭБ должна быть конфликтно-устойчивой в динамике перевооружения сторон. Обобщая име-

ющиеся в литературе данные [5], можно выделить следующие направления повышения конфликтной устойчивости техники радиоподавления, подлежащие учету при обосновании стратегий ее развития:

- обеспечение энергетической избыточности;
- обеспечение информационной избыточности;
- обеспечение спектральной избыточности;
- обеспечение условий перманентной модернизации при конструировании;
- повышение уровня системной организации техники;
- развитие способов радиоподавления, обеспечивающих перевод радиоэлектронных средств и систем в невыгодный (нестандартный) режим работы;
- развитие средств радиоподавления, инвариантных к параметрам излучаемых сигналов.

Использование этих направлений потенциально позволит парировать без недопустимого снижения эффективности появление новых радиоэлектронных средств и систем противника и увеличить продолжительность жизненного цикла каждого поколения техники РЭБ, что особенно важно в условиях жестких финансовых ограничений. Однако их реализация ввиду наличия нерешенных технологических проблем и ресурсных ограничений невозможна одновременно и может быть осуществлена лишь последовательными шагами.

При оптимизации конфликтно-устойчивых в динамике перевооружения направлений развития техники РЭБ будем рассматривать однородные и неоднородные группы указанной техники (средства, комплексы или комплекты средств, составляющие техническую основу системы вооружения подразделения, части РЭБ), предназначенные для решения задач РЭБ в типовых боевых эпизодах. Задачи РЭБ в типовых боевых эпизодах, как правило, являются стабильными, длительно существующими, охватывают несколько программных периодов. При изменении (развитии) радиоэлектронного вооружения противника изменяются только параметры внутреннего содержания задач и эффективность их выполнения. Примером такого боевого эпизода может быть прикрытие войск от средств радиолокационной разведки, прицеливания и управления авиацией противника при отражении группового авиационного удара. В этом примере комплекс (комплект) техники РЭБ составляет техническую основу системы вооружения части РЭБ с самолетными средствами.

Конфликтно-устойчивое направление развития техники РЭБ – это одно из важнейших направлений развития различных типов техники РЭБ в рамках стратегии развития системы вооружения РЭБ в целом, обеспечивающее требуемый уровень эффективности решения задач РЭБ в типовых боевых эпизодах в динамике перевооружения противника на новые радиоэлектронные средства – объекты РЭБ.

В качестве критерия оптимальности развивающейся системы (комплекса, комплекта) на интервале прогнозирования примем минимум затрат на решение задач РЭБ, включая затраты на разработку, серийное производство (закупки) в необходимых объемах с учетом реальных и прогнозируемых потерь и эксплуатацию техники, при заданной эффективности.

Применительно к каждому боевому эпизоду имеем две развивающиеся конфликтно взаимодействующие системы:

1S – система радиоэлектронного вооружения противника;

2S – противодействующая ей наша система РЭБ.

Решения о перевооружении (замене) или оптимальном составе систем принимаются в дискретные моменты времени t_i на основе прогноза развития как противника 1S , так и своей стороны 2S . Развитие систем 1S , 2S происходит как по внутренним побудительным мотивам, так

и в виде реакции на прогнозируемое развитие противостоящей стороны. При долгосрочном прогнозировании обе стороны осуществляют независимое прогнозирование развития противостоящей системы, опираясь на информацию, которая имеется к моменту начала прогнозирования. Прогнозирование развития противника является самостоятельной научной задачей и в настоящей работе не рассматривается.

Задачу оптимизации развития системы 2S предлагается решать поэтапно в следующей последовательности.

1. Генерация допустимых по номенклатуре вариантов системы 2S , то есть вариантов состава этой системы Y_m , которые с учетом развития технологий и наличия ресурсов могут быть созданы на основе исходного состава системы Y_k в период t_i . Генерация выполняется на основе неформальных методов, с последующей фильтрацией вариантов по критериям технической реализуемости (наличие научно-технической и производственной базы, ресурса, сроков разработки и производства).

2. Локальная оптимизация количественного состава систем Y_m для каждого интервала времени, на котором возможно (допустимо) использование системы. Оптимизация проводится по критерию минимума стоимости решения задач системы в типовом боевом эпизоде при заданном уровне эффективности на рассматриваемых временных интервалах. При этом к стоимости решения задач системы относятся стоимости работ, приходящихся на t_i -й период по разработке, закупке (серийному производству) и эксплуатации средств (образцов), образующих систему. Методы локальной оптимизации системы 2S для большинства задач хорошо разработаны и здесь не рассматриваются. Каждый локально оптимальный вариант системы РЭБ Y_m сохраняет требуемую эффективность в течение нескольких интервалов времени, связанных с прогнозируемым изменением радиоэлектронных систем противника 1S . Таким образом, в результате локальной оптимизации формируется множество допустимых вариантов локально оптимальных систем РЭБ, которые иллюстрируются рисунком 1. Желтым цветом на рисунке отмечены ограничения на начало разработки системы Y_m из-за проблем финансового или технологического (элементная база) характера. Для систем Y_3, Y_4 кроме того показаны оптимистический, пессимистический и реалистический варианты начала разработки в условиях большой неопределенности ограничений. Синим цветом отмечены периоды, в которых эффективность системы не ниже требуемой.

Красным цветом отмечены периоды, начиная с которых эффективность системы становится ниже требуемой. В скобках указано, что выполняется на каждом этапе – разработка и закупка системы целиком (элементов системы) или только закупка. Из рисунка 1 видно, что выбор пути развития системы Y_m ограничивается не только требованиями реализуемости и эффективности, но и требованием порядка следования: система может развиваться, только если на предыдущем шаге выполнена ее разработка (так от состояния Y_{313} нельзя перейти к состояниям Y_{414}, Y_{424}).

3. Расчет переходной матрицы стоимостей. Очевидно, что переход от системы $Y_k(t_i)$ к системе $Y_m(t_{i+1})$ определяется для каждого интервала времени t_i (планового периода) не только составом системы $Y_m(t_{i+1})$, но и составом предшествующей системы. Затраты на формирование системы $Y_m(t_{i+1})$ из системы $Y_k(t_i)$ образуют матрицу стоимости переходов $c_{mk}(t)$.

4. Глобальная оптимизация сводится к определению оптимального маршрута переходов a_{im} от исходной системы (в примере от Y_{111} или Y_{211}) к последующим на всем интервале прогнозирования по критерию минимума затрат на решение задач РЭБ, а именно полной стоимости разработки, закупки и эксплуатации системы (комплекта) техники при заданной ее эффективности:

$$f_n = \min_{a_{i,m}} \sum_{i=0}^{n-1} \sum_{m=1}^M a_{i,m} c_{mk}, \quad (1)$$

где f_n – функция затрат при переходе от k -го варианта системы к m -му варианту системы в рамках n -го перехода;

$a_{i,m}$ – маршрут перехода в m -й вариант в i -й период времени.

Тип системы $Y = \{Y_m\}$	Этапы (плановые периоды), t_i				
	t_1	t_2	t_3	t_4	t_5
	Требуемая эффективность				
	$E(t_1)$	$E(t_1)$	$E(t_1)$	$E(t_1)$	$E(t_1)$
Y_6				Y_{614} (разр, зак)	Y_{615} (зак)
Y_5			Y_{513} (разр, зак)	Y_{514} (зак)	Y_{515} (зак)
Y_4				Y_{434} (разр, зак)	Y_{435} (зак)
			Y_{423} (разр, зак)	Y_{424} (зак)	Y_{425} (зак)
		Y_{412} (разр, зак)	Y_{413} (зак)	Y_{414} (зак)	Y_{415} (зак)
Y_3			Y_{323} (разр, зак)		
		Y_{312} (разр, зак)	Y_{313} (зак)		
Y_2	Y_{211} (разр, зак)	Y_{212} (зак)	Y_{213} (зак)		
Y_1	Y_{111} (зак)	Y_{112} (зак)			

Рисунок 1 – Иллюстрация результатов генерации и локальной оптимизации допустимых по реализуемости и эффективности систем РЭБ

Введем ограничения:

$$\sum_{i=0}^{n-1} \sum_{m=1}^M a_{im} c_{mk} \leq n, \quad (2)$$

$$a_{im} = \begin{cases} 1 \\ 0 \end{cases}. \quad (3)$$

Ограничение (2) означает, что количество маршрутов перехода в m -й вариант системы не превышает n маршрутов. При этом в фиксированный i -й период система может перейти только в один из вариантов системы m .

В ограничении (3) $a_{im} = 1$, если в i -й период времени осуществлен переход системы в один из вариантов m , в противном случае $a_{im} = 0$.

В общем случае c_{mk} зависит от времени i (программного периода).

С учетом сформулированного выше ограничения порядка следования необходимо исключить возможность выбора маршрута развития, пролегающего через неразработанную систему. Это требование можно выполнить, задавая бесконечно большие (неприемлемо большие) значения стоимости недопустимых переходов $c_{mk}(i-1)$.

5. Анализ оптимальных решений и выявление конфликтно-устойчивых направлений (путей) развития техники.

Таким образом, для решения задачи глобальной оптимизации необходимо построить главный элемент целевой функции – переходную матрицу стоимостей. Введем следующие две группы множеств:

$R_{mk}(r_{mk}^1, r_{mk}^2, \dots, r_{mk}^r, \dots, r_{mk}^R)$ – множество новых (модернизируемых) образцов, которые должны быть созданы для перехода от системы Y_k к системе Y_m ;

r_{mk}^r – количество образцов r -го типа в m -м варианте системы Y_m при переходе от системы Y_k ;

$Z_{mk}(z_{mk}^1, z_{mk}^2, \dots, z_{mk}^z, \dots, z_{mk}^Z)$ – множество образцов, которые были в системе Y_k и сохраняются в системе Y_m ;

z_{mk}^z – количество образцов z -го типа, которые были в системе Y_k и сохраняются в системе Y_m .

Определим теперь стоимость разработки новых образцов, стоимость серийного производства новых и существовавших ранее образцов с учетом их естественной убыли и потерь, стоимость эксплуатации системы Y_m .

Стоимость разработки новых образцов:

$$c_{mki}^p = \sum_{r \in R_{mk}} c_{ri}^p r_{mk}^r, \quad (4)$$

где c_{ri}^p – стоимость разработки r -го образца для i -го периода.

Стоимость серийного производства включает стоимость поставки (производства) новых образцов и стоимость дополнительной поставки (производства) существующих образцов, с учетом потребностей в них при переходе от системы Y_k к системе Y_m , а также естественной убыли техники и потерь в ходе ведения боевых действий.

$$c_{mki}^c = \sum_{r \in R_{mki}} \lambda_{mri} c_{ri}^c (1 + \Delta t_{mki} \xi_{ri}^n) \sum_{z \in Z_{mki}} c_{zi}^c \left[\lambda_{mzi} (1 + \Delta t_{mki} \xi_{zi}^n) - \lambda^{kzi} \right], \quad (5)$$

где ξ_{ri}^n, ξ_{zi}^n – годовые потери образца r -го, z -го типа соответственно в i -м периоде;

c_{ri}^c, c_{zi}^c – стоимость производства образцов r -го и z -го типа соответственно для i -го периода времени;

$\Delta t_{mki} = t_{mki} - t_{mki} - 1$ – продолжительность i -го периода (годы);

λ_{mri} – количество образцов r -го типа в составе систем $y_m(i)$;

$\lambda_{mzi}, \lambda_{kzi}$ – количество образцов z -го типа в составе систем $y_m(i), y_k(i-1)$ соответственно.

Стоимость эксплуатации:

$$c_{mki}^Y = \Delta t_{mki} \left[\sum_{r \in R_{mki}} \lambda_{mri} c_{ri}^Y + \sum_{z \in Z_{mki}} \lambda_{mzi} c_{zi}^Y \Delta t_{mki} \right], \quad (6)$$

где c_{zi}^Y, c_{ri}^Y – стоимости годовой эксплуатации образца z -го, r -го типов соответственно в i -й период времени.

Таким образом, полностью определены затраты при переходе от системы $y_k(i)$ к системе $y_m(i)$:

$$c_{mki} = c_{mki}^p + c_{mki}^c + c_{mki}^y. \quad (7)$$

В связи с тем, что целевая функция f_n (1) аддитивна, а процесс оптимизации является n -шаговым (для последовательности плановых периодов), оптимальное решение может быть получено методом динамического программирования [4].

Совокупность коэффициентов $a_{i,m}(n)$ и определит оптимальный путь конфликтно-устойчивого развития системы РЭБ с минимальными затратами на его реализацию. Совокупность оптимальных путей развития системы РЭБ по плановым периодам определяет стратегию развития системы на долгосрочную перспективу.

Список использованных источников

1. Защита от радиопомех / Под ред. М.В. Максимова. – М.: Советское радио, 1976.
2. Радиоэлектронное подавление информационных каналов систем управления оружием / Под ред. Ю.М. Перунова. Изд. 2-е, испр. и дополн. – М.: Радиотехника, 2005. – 416 с.
3. Козлов С.В., Карпухин В.И., Лазаренков С.М. Модели конфликта авиационных систем радиоэлектронной борьбы и противовоздушной обороны. – Воронеж: ВУНЦ ВВС «ВВА», 2013. – 467 с.
4. Вагнер Г. Основы исследования операций. – Т. 2. – М: Мир, 1973. – 487 с.
5. Баринов С.П., Карпухин В.И. Методы обоснования и направления развития техники радиоэлектронного подавления радиолокации // Вестник Военного авиационного инженерного университета. – 2013. – № 2 (20). – С. 116-122.