

DOI: 10.17516/1999-494X-0355

УДК 623.9

Ways to Improve the Effectiveness of Defeating Group Air Targets in Anti-Aircraft Combat

**Alexander A. Antsiferov^a,
Anton I. Bedritsky^a, Alexander V. Bogdanov^a,
Alexander A. Kuchin^a, Igor V. Lyutikov^b,
Anna S. Muravyeva^a and Andrey A. Filonov^{a*}**

*^aVKO Military Academy named after Marshal
of the Soviet Union Georgiy Zhukov
Tver, Russian Federation*

*^bMilitary Training and Research Center of the Air Force
«Air Force Academy ft. Professor N. E. Zhukovsky and Y. A. Gagarin»
Voronezh, Russian Federation*

Received 06.09.2021, received in revised form 04.10.2021, accepted 21.10.2021

Abstract. This article discusses ways to improve the efficiency of anti-aircraft guided missiles to intercept group air targets. An effective way to defeat the elements of group air targets using anti-aircraft guided missiles is the joint guidance of several missiles at several air targets from the group. The basic technical requirements for anti-aircraft guided missiles for the implementation of this principle are defined.

Keywords: anti-aircraft guided missile, group air target, Doppler.

Citation: Antsiferov A. A., Bedritsky A. I., Bogdanov A. V., Kuchin A. A., Lyutikov I. V., Muravyeva A. S., Filonov A. A. Ways to improve the effectiveness of defeating group air targets in anti-aircraft combat, J. Sib. Fed. Univ. Eng. & Technol., 2021, 14(7), 763–775. DOI: 10.17516/1999-494X-0355

Пути повышения эффективности поражения групповых воздушных целей в противовоздушном бою

А. А. Анциферов^а, А. И. Бедрицкий^а,
А. В. Богданов^а, А. А. Кучин^а,
И. В. Лютиков^б, А. С. Муравьева^а, А. А. Филонов^а

^аВоенная академия воздушно-космической обороны
имени Маршала Советского Союза Г. К. Жукова
Российская Федерация, Тверь

^бВоенный учебно-научный центр Военно-воздушных сил
«Военно-воздушная академия
имени профессора Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина»
Российская Федерация, Воронеж

Аннотация. Рассмотрены пути повышения эффективности применения зенитных управляемых ракет в интересах перехвата групповых воздушных целей. Эффективным способом поражения элементов групповой воздушной цели с помощью зенитных управляемых ракет является совместное наведение нескольких ракет на несколько воздушных целей из состава группы. Определены основные технические требования, предъявляемые к зенитным управляемым ракетам для реализации указанного принципа.

Ключевые слова: зенитная управляемая ракета, групповая воздушная цель, доплеровская частота.

Цитирование: Анциферов, А. А. Пути повышения эффективности поражения групповых воздушных целей в противовоздушном бою / А. А. Анциферов, А. И. Бедрицкий, А. В. Богданов, А. А. Кучин, И. В. Лютиков, А. С. Муравьева, А. А. Филонов // Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии, 2021, 14(7). С. 763–775. DOI: 10.17516/1999-494X-0355

Введение

Непрекращающееся развитие средств воздушного нападения (СВН), значительное повышение их количественных и качественных характеристик, непрерывное совершенствование способов их применения – все это предъявляет сложные требования как в целом к системе противовоздушной обороны, так и к отдельным ее элементам. В основе тенденций развития средств противовоздушной обороны (ПВО) и их технического облика должны лежать не только тактико-технические средства СВН, особенности их боевого применения, но и достижения научно-технического прогресса. Эксперты выделяют следующие группы негативных факторов, которые необходимо учитывать при модернизации существующих и разработке перспективных средств ПВО [1, 2]:

- широкое применение беспилотных ударных средств, к которым следует отнести высокоточное ракетное оружие, оперативно-тактические и тактические баллистические ракеты, беспилотные летательные аппараты;
- использование различных видов активных и пассивных помех, затрудняющих эффективное функционирование информационных подсистем средств ПВО;
- применение материалов и технологий, снижающих радиолокационную заметность СВН;
- массированное (групповое) применение СВН, организуемое в виде нескольких различных по своему назначению эшелонов с использованием средств подавления ПВО.

Одним из эффективных путей уничтожения авиации противника является применение зенитных управляемых ракет (ЗУР), которыми оснащены зенитные ракетные комплексы (ЗРК) и зенитные ракетные системы (ЗРС), стоящие на вооружении зенитных ракетных войск (ЗРВ) и составляющие основную огневую силу в системе ПВО [1, 2].

Рассмотрим далее особенности применения ЗУР в интересах перехвата групповых воздушных целей (ГВЦ) и проведем анализ влияния этих особенностей на технические характеристики их информационных подсистем.

Цель работы – анализ возможных путей повышения эффективности поражения групповых воздушных целей зенитными управляемыми ракетами и оценка влияния данных факторов на облик перспективных зенитных управляемых ракет.

Использование в ЗУР активных радиолокационных головок самонаведения (АРГС)

Одним из наиболее перспективных направлений развития ЗУР является использование в них активных радиолокационных головок самонаведения (АРГС).

Применение АРГС позволяет реализовать следующие преимущества по сравнению с полуактивными головками самонаведения (ПАРГС) [3, 4]:

- при использовании ракет с АРГС не нужен дополнительный канал подсвета цели;
- процесс самонаведения ракеты с АРГС на воздушную цель более устойчив;
- повышается живучесть боевых средств ЗРК средней и большой дальности;
- применение ракеты с АРГС позволяет приблизиться к реализации концепции «пустил-забыл», что значительно повышает эффективность противовоздушного боя;
- возможность использования в качестве зондирующего сигнала когерентных импульсных последовательностей с высокими (при наведении ракеты в переднюю полусферу) и средними (при наведении ракеты в заднюю полусферу) частотами повторения импульсов, что позволит обеспечить максимальные дальности обнаружения воздушных целей на встречных и догонных курсах;
- высокое разрешение по угловым координатам, скорости и дальности [5];
- большая дальность обнаружения целей;
- возможность использования высокоинтеллектуальной, адаптивной обработки сигналов и помех, при которой ракета будет способна выбирать заданные воздушные цели для их атаки [6];
- возможность комплексирования пассивного, полуактивного и активного каналов в интересах повышения точности и помехозащищенности ЗРК;
- высокая скрытность работы и помехозащищенность ЗРК [7–9].

Хотя возможности радиолокационных станций большой и средней дальности позволяют обнаруживать сотни целей, но одновременно обстреливать они могут порядка 10–20 целей (для одного комплекса) [10]. Пропускная способность каналов подсвета атакуемых воздушных целей не позволяет устойчиво наводить несколько ракет на несколько воздушных целей в случае их совместных действий в группе. Увеличить интенсивность обстрела целей можно применяя ракеты с АРГС [10].

Одновременное наведение нескольких ЗУР на несколько целей из состава их группы

Одним из путей повышения эффективности поражения элементов ГВЦ с помощью ЗУР с АРГС является одновременное их наведение на несколько целей из состава их группы.

Эффективность такого принципа атаки ГВЦ достигается в случае, когда каждая ракета наводится только на конкретную назначенную воздушную цель (ВЦ) из состава группы (индивидуальное наведение) в соответствии с введенным в ее АРГС предстартовым целеуказанием (ЦУ) [2, 11].

В качестве показателя при оценке эффективности поражения воздушных целей при наличии информации об их численном составе примем величину заданного ущерба, наносимого противнику, который может быть выражен в виде математического ожидания (МОЖ) [4]:

- числа всех сбитых целей (одиночных, целей в каждой группе);
- заданного количества сбитых целей из их общего количества.

Эти ущербы обуславливают, соответственно, следующие виды целераспределения (ЦР):

- поражение всех одиночных и групповых воздушных целей;
- поражение заданного количества целей из их общего количества.

При этом ЦР может быть случайным, когда каждая ракета может наводиться на любую цель, в результате чего возможно перепутывание атакуемых целей и их неравномерное распределение между ракетами, или идеальным, когда цели равномерно распределены между атакуемыми их ракетами, а воздействие по каждой цели осуществляется независимо друг от друга без анализа предыдущих атак.

В [12] приведена общая методология, а в [4] – частные методики количественной оценки эффективности атаки ГВЦ при различном характере ЦР. Используя эти подходы и интерпретируя известные формулы в несколько ином физическом смысле, произведем в дальнейшем потенциальную граничную оценку прироста эффективности атаки ГВЦ в условиях идеального ЦР с его вышеприведенными видами относительно соответствующих ситуаций атаки ГВЦ при случайном ЦР.

Рассмотрим две простейшие модели воздушного боя без учета его динамики и огневого противодействия со стороны противника, на основе которых оценим потенциальную эффективность поражения воздушных целей.

Модель 1 – воздушный бой со случайным ЦР, модель 2 – воздушный бой с идеальным ЦР. При этом МОЖ числа сбитых целей соответственно $M_1[N_{\text{цн}}]$ и $M_2[N_{\text{цн}}]$ будут определяться следующим образом [5]:

$$M_1[N_{\text{цн}}] = N_{\text{ц}} \left(1 - \left(1 - \frac{P_1}{N_{\text{ц}}} \right)^{N_{\text{рп1}}} \right), \quad (1)$$

$$M_2[N_{\text{цн}}] = P_1 N_{\text{рп2}}, \quad (2)$$

где P_1 – вероятность поражения цели при атаке одной ракетой; $N_{\text{ц}}$ – общее количество воздушных целей; $N_{\text{рп1}}$ и $N_{\text{рп2}}$ – потребное количество ЗУР для поражения заданного количества целей при первой и второй моделях воздушного боя соответственно.

Тогда потенциальный прирост W в эффективности поражения воздушных целей при достижении заданного ущерба (в данном случае поражение всех целей как при первой, так и при второй моделях воздушного боя, т. е. достижения $M_1[N_{цц}] = M_2[N_{цц}]$ в виде относительного количества затрачиваемых ракет, будет определяться как

$$W = \frac{N_{рп1} - N_{рп2}}{N_{рп1}} 100\%, \quad (3)$$

или с учетом выражений (1) и (2)

$$W = 1 - \frac{M[N_{цц}]}{P_1} \frac{\lg\left(1 - \frac{P_1}{N_{ц}}\right)}{\lg\left(1 - \frac{M[N_{цц}]}{N_{ц}}\right)}. \quad (4)$$

На рис. 1 приведены результаты расчетов в соответствии с выражением (4) потенциального прироста в эффективности атаки ГВЦ при условии, что ее численный со-

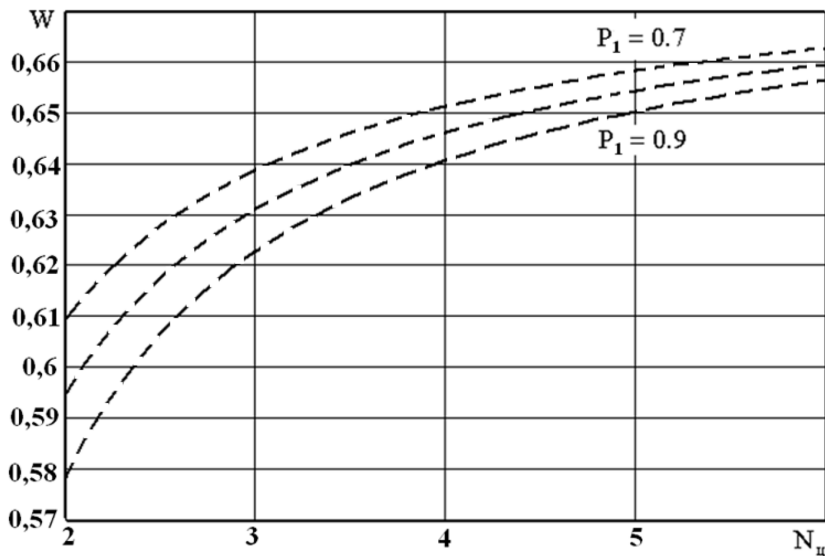


Рис. 1. Потенциальный прирост эффективности атаки ГВЦ

Fig. 1. Potential increase in the effectiveness of the attack of a group air target

став не превышает шести. При этом принято, что ошибка в равенстве истинного численного состава групповой воздушной цели и МОЖ их поражения не превышает 5 %, т. е. $M_1[N_{цц}] = M_2[N_{цц}] = 0,95 N_{ц}$.

Из анализа данных рис. 1 следует, что для этого случая потенциальный прирост эффективности атаки групповой воздушной цели с идеальным ЦР (модель 2) относительно ситуации со случайным ЦР (модель 1) в зависимости от численного состава группы и вероятности поражения P_1 является существенным и может составлять 58–66 % [4].

Обеспечение в АРГС зенитной управляемой ракеты разрешения элементов ГВЦ

Реализация индивидуального наведения ЗУР на назначенную воздушную цель из состава их группы в соответствии с введенным в ее АРГС предстартовым ЦУ обуславливает необходимость в первоочередном решении задачи разрешения целей в группе (разрешение элементов ГВЦ) [2].

Известно [13], что потенциальная разрешающая способность по дальности при простом зондирующем сигнале определяется длительностью импульса и для современных импульсных АРГС, при длительности импульса $\tau_{\text{и}} = 1,5 \cdot 10^{-6} \dots 2 \cdot 10^{-6}$ с [14], находится в пределах 450...600 м. То есть даже потенциальные ее способности не позволяют разрешать групповую воздушную цель, состоящую из авиационных комплексов тактической или палубной авиации, осуществляющую полет в боевых порядках с дистанциями до 450 м и более. Здесь необходимо принять во внимание, что на практике эта ситуация еще более усугубится и реальная разрешающая способность будет в 2–3 раза хуже потенциальной [14]. Кроме того, при наведении ЗУР на встречных курсах с целью в АРГС применяется режим зондирования с высокой частотой повторения импульсов (ВЧПИ), в котором имеет место высокая неоднозначность измерения дальности [13], а применение алгоритмов устранения этой неоднозначности приводит к ухудшению точности ее измерения до 500–1000 м [13].

По угловым координатам (азимуту и углу места) потенциальная разрешающая способность равна ширине диаграммы направленности антенны (ДНА) по уровню половинной мощности $\delta\beta_{\text{разр пот}} = 2\theta_{0,5P}$ [15]. В свою очередь, ширину ДНА можно приближенно определить по линейному размеру диаметра антенны [15] как

$$2\theta_{0,5P} = \frac{K \cdot \lambda}{d_A},$$

где $K = 51^\circ \dots 68^\circ$ – коэффициент, характеризующий амплитудно-фазовое распределение по радиусу апертуры антенны; λ – длина волны АРГС; d_A – максимальный линейный размер зеркала антенны в плоскости луча; $2\theta_{0,5P}$ – ширина ДНА по уровню половинной мощности в соответствующей плоскости.

Известно [16], что для ракеты МІМ-104 (ЗРК «Пэтриот») $d_A = 305$ мм. Тогда при $\lambda = 3 \div 6$ см [16] ширина ДНА составит $2\theta_{0,5P} = 5^\circ 1' \div 13^\circ 22'$.

На рис. 2 схематично изображено наведение ЗУР с АРГС на элемент групповой воздушной цели, состоящей из двух самолетов.

На рис. 2, кроме ранее указанных, обозначены: $\Delta l_{\text{ц}}$ – линейный интервал между элементами ГВЦ; λ – длина волны радиолокационной системы обработки сигналов АРГС; $D_{\text{разреш}}$ – дальность разрешения (обнаружения) до ГВЦ; V_p и $V_{\text{ц}}$ – скорости ЗУР и элементов ГВЦ соответственно.

Линейное $\Delta l_{\text{ц}}$ разрешение двух самолетов по угловой координате можно определить как [8]

$$\Delta l_{\text{ц}} = 2 \cdot D_{\text{разреш}} \cdot \text{tg} \left(\frac{\theta_{0,5P}}{2} \right) = \frac{K \cdot \lambda}{d_A}.$$

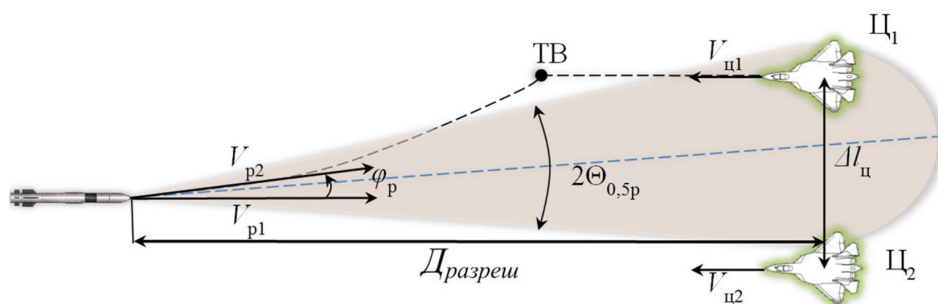


Рис. 2. Процесс наведения ЗУР с АРГС на элемент групповой воздушной цели

Fig. 2. The process of guidance of an anti-aircraft guided missile with an active radar homing head on an element of a group air target

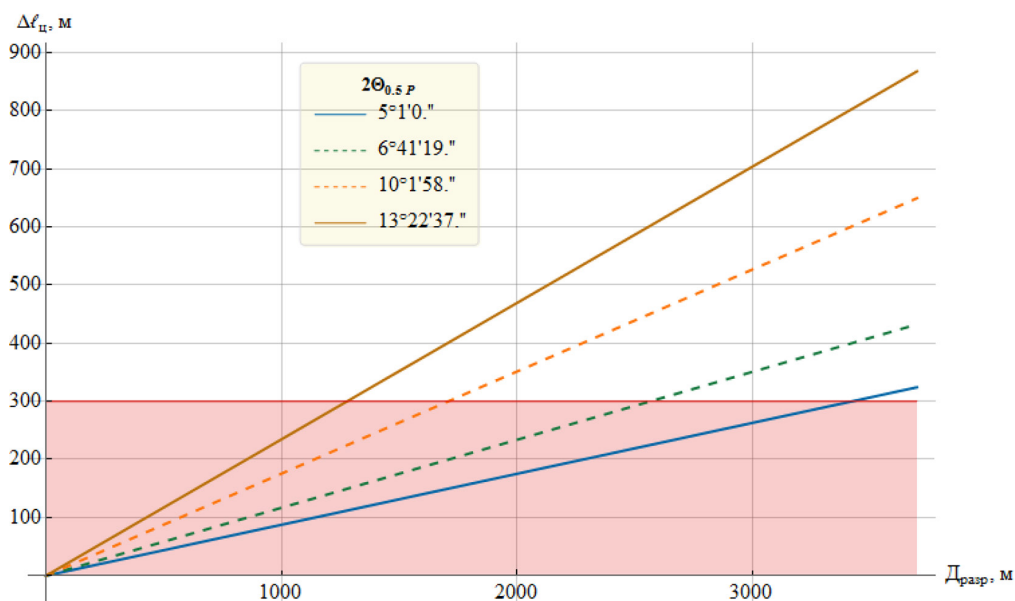


Рис. 3. Зависимость минимального требуемого линейного разрешения элементов ГВЦ по угловым координатам от дальности при $2\Theta_{0,5P} = 5^{\circ}1' \div 13^{\circ}22'$

Fig. 3. Dependence of the minimum required linear resolution of the elements of a group air target in angular coordinates on the range at $2\Theta_{0,5P} = 5^{\circ}1' \div 13^{\circ}22'$

При рассчитанной выше ширине ДНА и определенном ранее интервале между парой самолетов потенциальная дальность разрешения ГВЦ составит $D_{\text{разреш}} = 1280 \dots 3420$ м (рис. 3). В свою очередь, при дальностях обнаружения в современных и перспективных АРГС ЗУР порядка $45 \div 50$ км [14] при рассчитанной ширине ДНА линейные расстояния, на которых ГВЦ будет разрешена, составят $\Delta l_{\text{ц}} = 3940 \dots 11730$ м.

По приведенным расчетам видно, что из-за существующей разрешающей способности АРГС ЗУР по дальности и угловым координатам эффективный обстрел элементов ГВЦ, под которым понимается заранее выполненное целеуказание на один из элементов ГВЦ и самонаведение на него, значительно затруднен. Этот факт можно проиллюстрировать тем, что при

наведении на один из элементов ГВЦ после их разрешения и захвата одного из них может быть необходим разворот на него ЗУР, который потребует создания значительных поперечных перегрузок [14]. Потребные перегрузки при этом в зависимости от дальности разрешения и интервала между самолетами (см. рис. 2) могут быть рассчитаны как [14]

$$n_n \geq \sqrt{\frac{4\Delta l_n^2 V_{сбл}^4}{D^4 g^2} + 1},$$

где $V_{сбл}$ – радиальная скорость сближения ЗУР и элемента ГВЦ, на который осуществляется самонаведение; D – значение вектора дальности, компланарного вектору скорости до разрешенного АК ОТА; g – ускорение свободного падения.

Из анализа зависимости потребных перегрузок ЗУР для разворота на захваченный АРГС элемент ГВЦ от дальности разрешения цели при различных линейных ошибках наведения Δl (рис. 4) следует, что их превышение над располагаемыми, которые для современных ЗУР в зависимости от высоты полета составляют от 10 до 40 ед., может достигать десятков единиц.

Полученные результаты позволяют сделать следующие выводы:

- в главном луче ДНА АРГС ЗУР одновременно может оказаться не только пара самолетов, но и несколько их групп;
- разрешение ГВЦ по угловым координатам на дальности 1280...3420 м позволяет реализовать в АРГС ЗУР только случайное ЦР целей, которое является неэффективным.

Использование узкополосной доплеровской фильтрации при обработке отраженных сигналов в головке самонаведения ЗУР

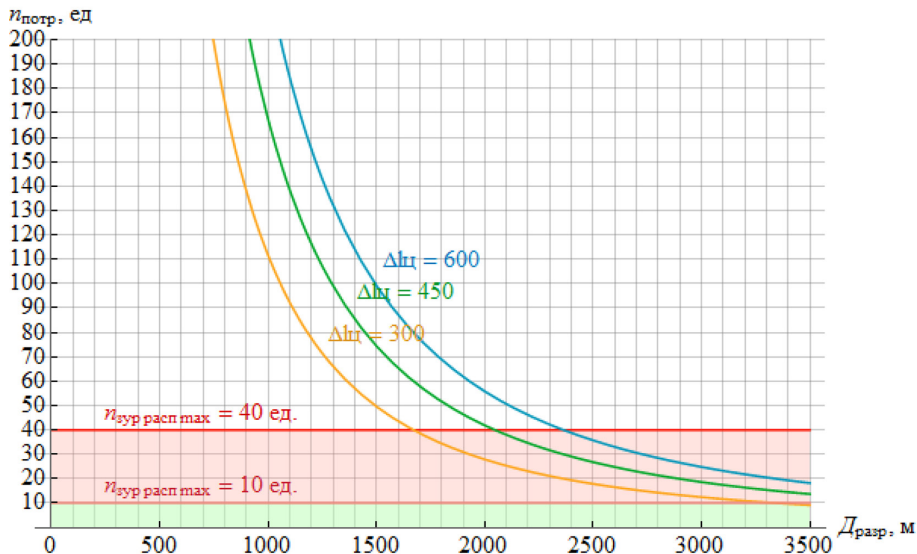


Рис. 4. Зависимость потребных перегрузок ЗУР для разворота на сопровождаемый ее ГСН элемент ГВЦ от дальности разрешения для линейных ошибок Δl ЗУР 300, 450 и 600 м

Fig. 4. Dependence of the required overloads of an anti-aircraft guided missile for turning to a group air target element accompanied by its homing head on the resolution range for linear errors Δl anti-aircraft guided missile 300, 450 and 600 м

Анализ опыта боевых действий показал, что для достижения своих целей противник применяет авиацию как в разомкнутых боевых порядках, так и в боевых порядках, в которых не представляется возможным решение задачи разрешения целей в группе (групповая воздушная цель) [2].

У нас в стране и за рубежом для повышения эффективности атаки ГВЦ путем наивыгоднейшего (наилучшего) целераспределения [2, 14], а также для решения известных проблем при самонаведении ЗУР на различные воздушные цели [15] (амплитудные и угловые шумы, или «мерцание») проводятся исследования, направленные на совершенствование методического и алгоритмического обеспечения АРГС. В частности, это касается вопросов повышения разрешающей способности АРГС элементов ГВЦ.

Одним из эффективных путей разрешения элементов ГВЦ, находящихся в главном луче диаграммы направленности антенны (ДНА) АРГС, является использование узкополосной доплеровской фильтрации (УДФ) при обработке отраженных сигналов в АРСГ [14]. Фундаментальное значение для увеличения дальности разрешения при такой обработке имеет ширина полосы пропускания узкополосного доплеровского фильтра Δf_ϕ , которая у современных АРСГ составляет 50÷100 Гц [14].

Известно [2, 14], что разность доплеровских частот, обусловленных разностью скоростей сближения с Π_1 и Π_2 (см. рис. 2), можно определить как

$$\Delta F = \frac{2 \cdot \Delta l_\Pi}{\lambda \cdot D_{\text{разреш}}} (V_p \sin \varphi_p + V_\Pi \sin \varphi_\Pi). \quad (5)$$

При наличии в системе обработки отраженных сигналов узкополосного доплеровского фильтра с полосой пропускания Δf_ϕ дальность, на которой элементы ГВЦ будут разрешены, можно определить как

$$D_{\text{разреш}} = \frac{2 \cdot \Delta l_\Pi}{\lambda \cdot \Delta f_\phi} (V_p \sin \varphi_p + V_\Pi \sin \varphi_\Pi). \quad (6)$$

Тогда для определенных выше параметров боевого порядка, длин волн, скоростей ЗУР – $V_p = 1000$ м/с и АК ОТА – $V_\Pi = 250$ м/с при $\Delta f_\phi = 50 \div 100$ Гц значения максимальной дальности разрешения элементов ГВЦ в зависимости от угла φ_p (см. рис. 2) приведены на рис. 5.

Из анализа выражения (6) и рис. 5 следует, что дальность разрешения элемента ГВЦ по скорости (доплеровской частоте) при принятых условиях зависит от величины полосы пропускания Δf_ϕ узкополосного доплеровского фильтра и тем больше, чем полоса фильтра меньше. Так, при $\Delta f_\phi = 50 \div 100$ Гц условием для разрешения ГВЦ в скоростном канале с дальностей ее обнаружения, называемом в известной литературе [17] автоселектором скорости, будет наведение с сохранением угла визирования группы АК ОТА под углами $\varphi_p = 5 \div 18^\circ$ в плоскости наведения ЗУР.

Эффективность работы алгоритмов обработки сигналов на основе УДФ, обеспечивающих разрешение элементов ГВЦ, во многом определяется условиями радиолокационного наблюдения отраженных от ГВЦ сигналов в АРСГ ракеты [2], которые (условия), в свою очередь, можно обеспечить за счет реализации алгоритмов траекторного управления наблюдением [2, 17, 18].

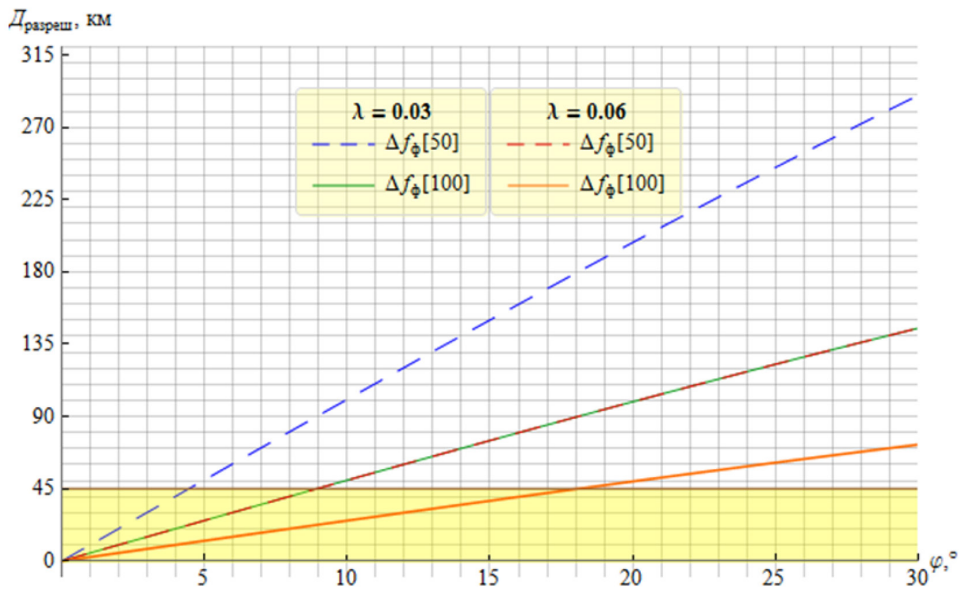


Рис. 5. Зависимость дальности разрешения ГВЦ по скорости в узкополосном доплеровском фильтре от угла ее визирования в АРГС ЗУР при $\Delta f_{\phi} = 50$ и 100 Гц

Fig. 5. The dependence of the resolution range of a group air target in speed in a narrow-band Doppler filter on the angle of sight in the active radar homing head of an anti-aircraft guided missile at $\Delta f_{\phi} = 50$ and 100 hertz

Заклучение

С учетом вышесказанного можно сделать следующие выводы.

1. Приоритетным направлением развития парка ЗУР предлагается использование в них активных радиолокационных головок самонаведения.

2. Одним из путей повышения эффективности поражения элементов групповой воздушной цели с помощью ЗУР с АРГС является одновременное их наведение на несколько целей из состава их группы.

3. Эффективность такого принципа атаки ГВЦ достигается в случае, когда каждая ракета наводится только на конкретную назначенную воздушную цель из состава группы (индивидуальное наведение) в соответствии с введенным в ее АРГС предстартовым целеуказанием.

4. Реализация индивидуального наведения ЗУР на назначенную воздушную цель из состава их группы в соответствии с введенным в ее АРГС предстартовым ЦУ обуславливает необходимость в первоочередном решении задачи разрешения целей в группе (разрешение элементов ГВЦ).

5. Разрешение ГВЦ по угловым координатам не всегда является эффективным, поэтому предлагается для разрешения элементов ГВЦ, находящихся в главном луче диаграммы направленности антенны АРГС, использовать узкополосную доплеровскую фильтрацию при обработке отраженных сигналов.

Указанные результаты анализа возможных путей повышения эффективности поражения групповых воздушных целей зенитными управляемыми ракетами могут быть использованы при модернизации существующих и разработке перспективных систем самонаведения зенитных управляемых ракет.

Список литературы / References

- [1] Акопян И. Г. Мозг ракеты. *Воздушно-космическая оборона*, 2006, 2 [I. G. Akopyan The brain of the rocket. *Aerospace defense*, 2006, 2 (in Russian)]
- [2] Богданов А. В., Филонов А. А., Ковалев А. А., Кучин А. А. и др. *Методы самонаведения истребителей и ракет класса «воздух-воздух» на групповую воздушную цель*: монография. Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2014, 168 с. [Bogdanov A. V., Filonov A. A., Kovalev A. A., Kuchin A. A. *Homing methods of fighters and air-to-air missiles to a group air target: monograph*. Krasnoyarsk: Siberian Federal University, 2014, 168 p. (in Russian)]
- [3] Анциферов А. А., Богданов А. В., Бондарев В. Н., Гарин Е. Н., Гончаров А. М., Кучин А. А., Лютиков И. В. Синтез оптимальных алгоритмов наведения летательных аппаратов на групповую воздушную цель, *Журнал Сибирского федерального университета. Техника и технологии*, 2017, 10(2), 169–182 [Antsiferov A. A., Bogdanov A. V., Bondarev V. N., Garin E. N., Goncharov A. M., Kuchin A. A., Lyutikov I. V. Synthesis of optimal algorithms for guiding aircraft to a group air target. *Journal of Siberian Federal University. Engineering and technology*, 2017, 10(2), 169–182 (in Russian)]
- [4] Богданов А. В., Кучин А. А., Мещеряков В. Г., Филонов А. А., Лютиков И. В. Методы наведения летательных аппаратов на групповую воздушную цель в интересах построения радиоэлектронных систем управления с элементами поддержки решений летчика. *Радиотехника*, 2013, 6, 65–69 [Bogdanov A. V., Kuchin A. A., Meshcheryakov V. G., Filonov A. A., Lyutikov I. V. Methods for guiding aircraft to a group air target in the interests of building electronic control systems with elements of support for the pilot's decisions. *Radiotekhnika*, 2013, 6, 65–69 (in Russian)]
- [5] Богданов А. В., Горбунов С. А., Кучин А. А., Шпортко С. А. Точностные и вероятностные характеристики алгоритма распознавания режима полета вертолета в радиолокационной системе воздушного базирования. *Журнал Сибирского федерального университета. Техника и технологии*, 2018, 11(3), 358–370 [Bogdanov A. V., Gorbunov S. A., Kuchin A. A., Shportko S. A. Accuracy and probabilistic characteristics of the helicopter flight mode recognition algorithm in an airborne radar system, *Journal of Siberian Federal University. Engineering and technology*, 2018, 11(3), 358–370 (in Russian)]
- [6] Богданов А. В., Коротков С. С., Кучин А. А., Бондарев В. Н., Лютиков И. В. Концепция распознавания воздушных целей в авиационном радиолокационном комплексе. *Журнал Сибирского федерального университета. Техника и технологии*, 2016, 9(3), 319–331 [Bogdanov A. V., Korotkov S. S., Kuchin A. A., Bondarev V. N., Lyutikov I. V. The concept of recognition of air targets in the aviation radar complex, *Journal of Siberian Federal University. Engineering and technology*, 2016, 9(3), 319–331 (in Russian)]
- [7] Жиронкин С. Б., Близняк А. А., Кучин А. А. Помехоустойчивость запросного канала опознавания с широкополосными сигналами и корректирующими кодами в условиях импульсных шумовых и внутрисистемных помех. *Журнал Сибирского федерального университета. Техника и технологии*, 2019, 12(6), 673–682 [Zhironkin S. B., Bliznyuk A. A., Kuchin A. A. Jamming Resistance of the Inbound Channel of an Identification System with Broadband Signals and Error Control Codes in the Conditions of Pulse Noise and Intra-System Jamming, *Journal of Siberian Federal University. Engineering and technology*, 2019, 12(6), 673–682 (in Russian)]

[8] Замаараев В. В., Кутузов А. С., Лютиков И. В., Мальцев Д. В. Метод построения траектории скрытного выхода летательного аппарата в заданную точку зоны обнаружения обзорного радиолокатора, основанный на анализе спектра доплеровских частот принимаемого сигнала. *Журнал Сибирского федерального университета. Техника и технологии*, 2021, 14(3), 281–291 [Zamaraev V. V., Kutuzov A. S., Lyutikov I. V., Malcev D. V. Method of Constructing a Line Secretive Exit the Aircraft at a Given Point of the Detection Area Surveillance Radar Based on the Spectrum Analysis of the Doppler Frequency of the Received Signal, *Journal of Siberian Federal University. Engineering and technology*, 2021, 14(3), 281–291 (in Russian)]

[9] Богданов А. В., Закомолдин Д. В., Докучаев Я. С., Новиченок В. А., Кочетов И. В. Алгоритм идентификации уводящих по дальности и скорости помех в импульсно-доплеровских РЛС в интересах формирования достоверных оценок дальности и скорости при сопровождении воздушной цели. *Журнал Сибирского федерального университета. Техника и технологии*, 2019, 12(1), 30–40 [Bogdanov A. V., Zakomoldin D. V., Dokuchaev Y. S., Novichenok V. A., Kochetov I. V. Algorithm of Your Identification Quantities on the Distance and Speed of Interference in the Doppler Radar in the Interests of Forming the Reliable Estimates of the Distance and Speed at the Adaptation of the Air Objective, *Journal of Siberian Federal University. Engineering and technology*, 2019, 12(1), 30–40 (in Russian)]

[10] Митрофанов А. Прорыв ПВО превышением ее возможностей по перехвату целей: пути решения. Военное обозрение [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://topwar.ru/156999-proryv-pvo-prevysheniem-ee-vozmozhnostej-po-perehvatu-celej-puti-reshenija.html> (дата обращения 05.09.2021 г.) [Mitrofanov A. *Breakthrough of air defense by exceeding its capabilities to intercept targets: solutions*. Military Review [Electronic resource]. Access mode: <https://topwar.ru/156999-proryv-pvo-prevysheniem-ee-vozmozhnostej-po-perehvatu-celej-puti-reshenija.html> (date of access 05/09/2021) (in Russian)]

[11] Богданов А. В., Кучин А. А., Федотов А. Ю., Филонов А. А., Скрынников А. А. Алгоритм совместного оценивания функционально связанных координат и состояния групповой воздушной цели на основе линейной модели с марковской структурой. *Журнал Сибирского федерального университета. Техника и технологии*, 2019, 12(1), 41–63 [Bogdanov A. V., Kuchin A. A., Fedotov A. Yu., Filonov A. A., Skrynnikov A. A. Algorithm of Simultaneous Assessment of Functionally Related Aircraft Pricipal Axes and Clustered Air Target State Based on Linear Model with Markovian Structure, *Journal of Siberian Federal University. Engineering and technology*, 2019, 12(1), 41–63 (in Russian)]

[12] Абрамов В. Н., Москвителев Н. И., Дуров В. Р. *Боевое применение и боевая эффективность авиационных комплексов войск ПВО страны*. М.: Воениздат, 1979 [Abramov V. N., Moskvitelev N. I., Durov V. R. *Combat use and combat effectiveness of aviation systems of the country's Air Defense Forces*. Moscow: Military Publishing, 1979 (in Russian)]

[13] Антипов В. Н., Колтышев Е. Е., Кондратенков Г. С. и др. *Многофункциональные радиолокационные комплексы истребителей*. М.: Радиотехника, 2014 [Antipov V. N., Koltyshev E. E., Kondratenkov G. S. et al. *Multifunctional radar complexes of fighters*. Moscow: Radiotekhnika, 2014 (in Russian)]

[14] Анциферов А. А., Богданов А. В., Бондарев В. Н., Закомолдин Д. В., Иванов И. М., Кучин А. А., Беляев В. М., Голубенко В. А., Дедов М. В., Дрогалин В. В., Иванов Е. С., Ше-

стаков Н. А., Лютиков И. В., Тяпкин В. Н. Назначение, состав, конструктивные особенности и характеристики наземной аппаратуры регистрации радиолокационных сигналов в сантиметровом диапазоне волн. *Журнал Сибирского федерального университета. Техника и технологии*, 2018, 11(3), 318–324 [Antsiferov A. A., Bogdanov A. V., Bondarev V. N., Zakomoldin D. V., Ivanov I. M., Kuchin A. A., Belyaev V. M., Golubenko V. A., Dedov M. V., Drogalin V. V., Ivanov E. S., Shestakov N. A., Lyutikov I. V., Tyapkin V. N. The Appointment, Composition, Design Features and Characteristics of the Ground Equipment for Registration Radar Signals in the Centimeter Wavelength Range, *Journal of Siberian Federal University. Engineering and technology*, 2018, 11(3), 318–324 (in Russian)]

[15] Сколник М. И. *Справочник по радиолокации*. В 2 кн. Кн. 1. М.: Техносфера, 2014, 672 с. [Skolnik M. I. *Radar Handbook*. Vol. 1. In 2 volumes, Moscow: Tahnosfere, 2014, 672 p. (in Russian)]

[16] Коровин В. А. «Пэтриот» – символ лидера. *Техника и вооружение вчера, сегодня, завтра*. 2005, 5(6) [Korovin V. A. «Patriot» is a symbol of a leader. *Equipment and weapons yesterday, today, tomorrow*, 2005, 5(6) (in Russian)]

[17] Меркулов В. И., Верба В. С. *Системы радиопередачи. Кн. 2. Эффективность систем радиопередачи*: монография. М.: Радиотехника, 2014 [Merkulov V. I., Verba V. S. *Radio control systems. Book. 2. The effectiveness of radio control systems*: monograph. Moscow: Radiotekhnika, 2014 (in Russian)]

[18] Богданов А. В., Горбунов С. А., Кучин А. А., Хадур А. А. Алгоритм наведения управляемой ракеты класса «воздух-воздух» с активной радиолокационной головкой самонаведения на вертолет при различном характере его полета. *Журнал Сибирского федерального университета. Техника и технологии*, 2020, 13(7), 829–842 [Bogdanov A. V., Gorbunov S. A., Kuchin A. A., Hadur A. A. The Guidance Algorithm of Air-to-Air Guided Missile with an Active Radar Target-Seeking Head to a Helicopter with Various Modes of its Flight, *Journal of Siberian Federal University. Engineering and technology*, 2020, 13(7), 829–842 (in Russian)]