

УДК 621.396.96

ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ КООРДИНАТ КАЖУЩЕГОСЯ ЦЕНТРА РАДИОЛОКАЦИОННОЙ ЦЕЛИ В ЗЕНИТНЫХ ПУШЕЧНО-РАКЕТНЫХ КОМПЛЕКСАХ

Е.Н. БУЙЛОВ, С.А. ГОРШКОВ

Военная академия Республики Беларусь
Минск-57, 220057, Беларусь

Поступила в редакцию 17 октября 2016

Проведен анализ особенностей влияния дальностного и угловых шумов цели на точность измерения координат в зенитных пушечно-ракетных комплексах. Рассмотрен способ повышения точности измерения координат кажущегося центра радиолокационного объекта в широкополосном моноимпульсном радиолокаторе сопровождения.

Ключевые слова: зенитный пушечно-ракетный комплекс, кажущийся центр, широкополосный моноимпульсный радиолокатор сопровождения.

Введение

Исследования и разработка радиолокационных систем сопровождения и измерения связаны с рассмотрением различных источников ошибок: тепловой шум, многопутевое распространение радиоволн, нерегулярность атмосферной рефракции и шум целей. На малых дальностях (единицы километров) основное влияние на точность измерения координат протяженных целей будут вносить амплитудные, угловые, дальностные и скоростные шумы, вызванные интерференцией отражений от различных элементов объекта. При полете в турбулентной атмосфере результат интерференции постоянно меняется из-за изменения ориентации цели относительно локатора и ее формы, обусловленной наличием отклоняющихся (рули, элероны, закрылки и т.п.) и вращающихся (лопасти воздушных винтов или лопасти компрессоров и турбин) поверхностей [1–4].

Шумы протяженной цели в ряде случаев удобно рассматривать как флуктуации положения ее кажущегося центра отражения. Указанные флуктуации становятся особенно ощутимыми в высокоточных радиолокационных системах измерения параметров движения такого объекта. Теоретические аспекты статистического анализа блуждания кажущегося центра по угловым координатам и дальности рассмотрены в [4].

Целью данной статьи является повышение точности измерения координат (дальность и азимут) кажущегося центра цели в зенитных пушечно-ракетных комплексах (ЗПРК) и зенитных артиллерийских комплексах (ЗАК) за счет сверхразрешения по дальности.

1. Анализ ошибок стрельбы зенитными автоматами в зенитных пушечно-ракетных комплексах

Стрельба зенитными снарядами в ЗПРК неизбежно сопровождается рассеиванием траекторий. Если произвести при одних и тех же условиях обстрел цели, то действительные траектории полета снарядов не совпадут, величины промаха будут различны. Рассеивание снарядов зависит от многих причин, которые можно разбить на три группы: разнообразие начальных скоростей снарядов (различие весов зарядов, химических свойств пороха зарядов; температуры зарядов; плотностей заряжания; весов снарядов; размеров ведущего пояска и положения его на снаряде и др.); разнообразие углов бросания и направлений стрельбы

(различие установок прицела, уровня и угломера; наводки орудия в горизонтальной и вертикальной плоскостях; углов вылета и боковых смещений орудий при выстреле; мертвых ходов механизмов и др.); разнообразие условий полета снарядов после вылета из канала ствола (различие атмосферных условий; формы, весов, положений центра тяжести снарядов; окраски и смазки наружной поверхности снарядов и др.).

Ошибки измерения координат цели, приводов наведения и рассеивания снарядов в совокупности являются составляющими ошибок стрельбы ЗПК и подразделяются на систематические и случайные [5].

Систематическими называются такие ошибки, которые при стрельбе остаются постоянными и изменяются по вполне определенному закону. Эти ошибки компенсируются путем ввода соответствующих поправок. Величины систематических ошибок m_y , m_z , m_x (по углу места, азимуту и дальности, соответственно) определяют положение центра рассеивания точек пересечения действительных траекторий полета снарядов относительно объекта сопровождения на заданной дальности с картинной плоскостью (рис. 1).

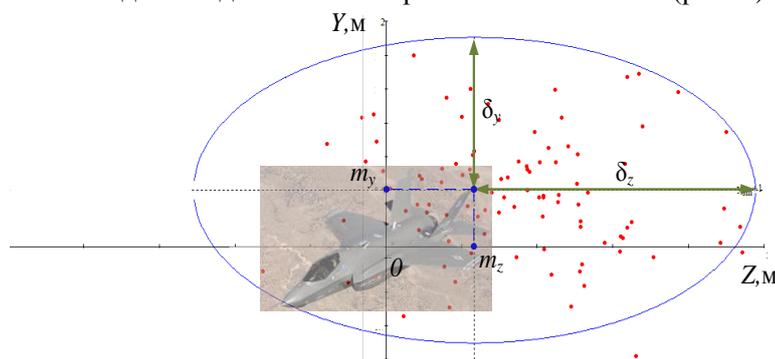


Рис. 1. Ошибки стрельбы в картинной плоскости

Случайными называются ошибки, которые при каждом выстреле могут принимать различные заранее неизвестные по величине и знаку значения. Эти ошибки вызывают случайные отклонения точек пересечения действительных траекторий полета снарядов для заданной дальности с картинной плоскостью относительно центра рассеивания и характеризуются средними квадратическими отклонениями δ_y , δ_z , δ_x (рис. 1).

В настоящее время большой интерес вызывает уменьшение флуктуационных ошибок измерения координат ввиду необходимости повышения точности, например, наведения стрелкового оружия, ракет, определения положения объекта и т.д. Рассмотрим особенности определения флуктуационной ошибки измерения координат протяженных целей.

Выражение, определяющее дисперсию флуктуационной ошибки фильтрации задающего воздействия, запишем в следующем виде [6]:

$$\sigma_{\text{фл}\alpha}^2 = S_{\text{экв}\alpha} \frac{T_{\text{об}}}{T_{\text{н}}} \Delta f_{0\alpha}, \quad (1)$$

где $T_{\text{об}}$ – интервал обращения к цели; $T_{\text{н}}$ – время наблюдения; $S_{\text{экв}\alpha}$ – эквивалентная спектральная плотность возмущающего воздействия; $\Delta f_{0\alpha}$ – ширина зубца амплитудной частотной характеристики дискретной системы с ключом, замыкающимся периодически.

Эквивалентная спектральная плотность возмущающего воздействия определяется следующим образом [6]:

$$S_{\text{экв}\alpha} = \frac{(\Delta\alpha)^2 R^6}{4\pi\rho^2 \Delta F_{\text{II}}} \left[1 + \frac{\rho}{R} + \frac{\rho}{R^3} \left(\frac{\Delta\alpha_{\text{ц}}}{\Delta\alpha} \right)^2 + \frac{\rho^2}{R^4} \left(\frac{\Delta\alpha_{\text{ц}}}{\Delta\alpha} \right)^2 \left(\frac{\Delta F_{\text{II}}}{\Delta F_{\text{LC}}} \right) \right], \quad (2)$$

где $\Delta\alpha$ – разрешающая способность по измеряемому параметру α ; ρ – отношение сигнал

шум после когерентного накопления сигнала; $R = \sqrt{2 \left(\frac{\Delta\alpha_{\text{ц}}}{\Delta\alpha} \right)^2 + 1}$ – радикал; $\Delta\alpha_{\text{ц}} = \sqrt{2\pi} \cdot \sigma_{\alpha}$ –

эффективный диапазон блуждания параметра $\alpha_{\text{ц}}$; σ_{α} – среднее квадратическое значение

блужданий параметра $\alpha_{ц}$ (координатный «шум» цели); $\Delta F_{ц}$ – ширина зубца амплитудной частотной характеристики когерентного накопителя; ΔF_{LC} – ширина зубца энергетического спектра отраженного сигнала.

Для случая, когда размеры цели значительно меньше разрешающей способности по параметру $\alpha_{ц}$ (точечная цель) можно сказать, что $\Delta\alpha_{ц} = \Delta\alpha$. Тогда $R = \sqrt{3}$ и выражение для эквивалентной спектральной плотности возмущающего воздействия примет вид [6]:

$$S_{э\text{кв}\alpha} = \frac{(\Delta\alpha)^2 3^3}{4\pi \rho^2 \Delta F_{ц}} \left[1 + \frac{\rho}{\sqrt{3}} + \frac{\rho}{3\sqrt{3}} + \frac{\rho^2}{3^2} \left(\frac{\Delta F_{ц}}{\Delta F_{LC}} \right) \right], \quad (3)$$

что соответствует максимальному значению координатного шума цели.

В том случае если разрешаются все блестящие точки, т.е. размеры цели много больше разрешающей способности по параметру $\alpha_{ц}$ (протяженная цель), значение $\Delta\alpha_{ц} = 0$, а $R = 1$.

Тогда $S_{э\text{кв}\alpha}$ определяется выражением [6, 7]:

$$S_{э\text{кв}\alpha} = \frac{(\Delta\alpha)^2 (1 + \rho)}{4\pi \rho^2 \Delta F_{ц}}, \quad (4)$$

что соответствует минимальному значению координатного шума цели.

На рис. 2 представлен пример расчета флюктуационной ошибки измерения азимута кажущегося центра цели при отношении сигнал/шум $\rho = 30$ дБ, $\Delta\beta = 2$ град. и видимом поперечном размере объекта типа F-15 в $l_{ц\text{вид}\beta} = 13$ м для диапазона дальностей $r_{ц} = (0,2 - 4)$ км. Непрерывной линией представлен результат расчета среднеквадратического отклонения (СКО) флюктуационной ошибки измерения азимута при наличии шума цели $\sigma_{\beta} = (0,3 \dots 0,5) l_{ц\text{вид}\beta} / r_{ц}$ (где $r_{ц}$ – дальность до цели), а пунктирной – при его отсутствии [7].

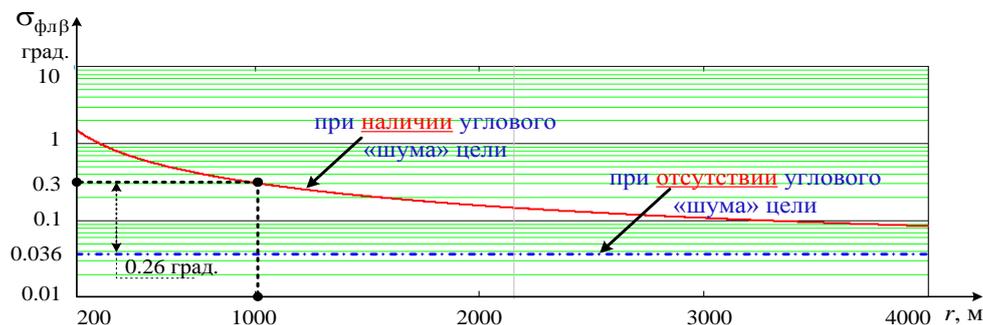


Рис. 2. Зависимость СКО флюктуационной ошибки измерения азимута кажущегося центра цели от дальности при: а – наличии углового шума цели; б – отсутствии углового шума цели

Из рис. 2 следует, что наибольшее блуждание кажущегося центра цели наблюдается при наличии координатного шума на небольших дальностях. Например, для дальности в 1000 м, значение СКО флюктуационной ошибки разовой оценки азимута составляет около 0,3 град. (5,2 м в картинной плоскости), из которой 0,26 град. (4,5 м в картинной плоскости) составляет угловой шум цели.

Уменьшение флюктуационной ошибки измерения параметра возможно за счет повышения разрешающей способности $\Delta\alpha$ либо отношения сигнал/шум ρ . Так как дальность стрельбы зенитными автоматами ЗПРК небольшая, то ρ будет иметь высокое значение. В данной статье рассматривается вопрос уменьшения дальностного и угловых шумов цели за счет повышения разрешающей способности по дальности.

2. Структура широкополосного моноимпульсного радиолокатора сопровождения

В разделе 1 предложен вариант уменьшения влияния координатного шума цели на величину флюктуационной ошибки измерения дальности и угловых координат за счет повышения разрешающей способности по дальности. В том случае, если разрешаются все блестящие точки, то значение эффективного диапазона блуждания энергетического центра

отражения по измеряемому параметру будет равно нулю. Тогда эквивалентная спектральная плотность возмущающего воздействия определяется в соответствии с выражением (4).

Для получения высокого разрешения по радиальной дальности возможно использование корреляционно-фильтрового способа обработки с полной частотной демодуляцией [8]. Полная частотная демодуляция отраженного многочастотного сигнала переводит дальностные различия между целями в частотные. Сжатие сигнала производится в анализаторе спектра (методом быстрого преобразования Фурье (БПФ)). При этом частотный сдвиг между узкополосными фильтрами анализатора эквивалентен дальностному сдвигу. Упрощенный вариант структуры широкополосного моноимпульсного радиолокатора сопровождения по одной угловой координате приведен на рис. 3. Здесь приемные каналы считаются абсолютно идентичными. Принципы и особенности работы такого устройства рассматривались в [9].

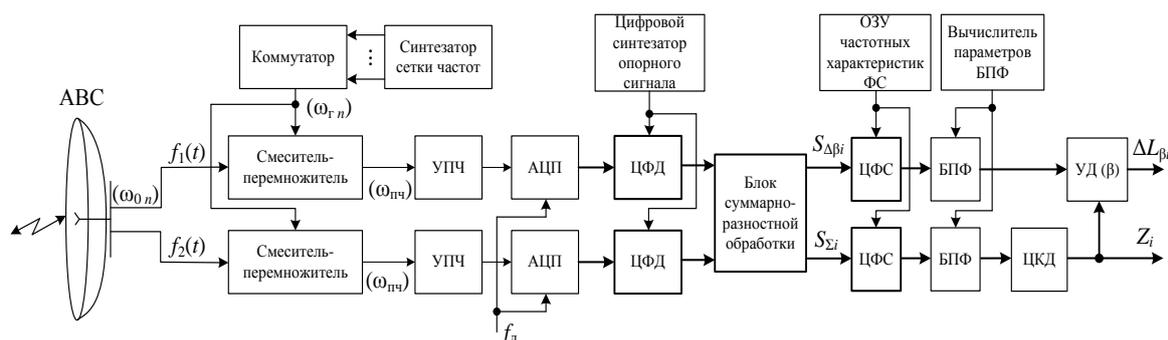


Рис. 3. Вариант структуры широкополосного моноимпульсного радиолокатора сопровождения по одной угловой координате

Принятый сигнал после усиления на сверхвысокой частоте поступает на смеситель-перемножитель, опорным напряжения которого служит одно из колебаний синтезатора сетки частот, обеспечивающего сброс всех сигналов на промежуточную частоту (ПЧ), где осуществляется полная частотная демодуляция сигнала ($\omega_{0n} - \omega_{rn} = \omega_{пр}$, где n – номер текущего радиоимпульса). Выбор необходимой опорной частоты обеспечивается работой коммутатора. После усилителя промежуточной частоты (УПЧ), который ограничивает полосу частот и обеспечивает достаточный уровень сигнала для работы аналого-цифрового преобразователя (АЦП), сигнал оцифровывается на ПЧ в АЦП с тактовой частотой f_d [10].

С выхода АЦП сигнал подается на цифровой фазовый детектор (ЦФД), где осуществляется перевод его на видеочастоту, фильтрация для устранения эффекта наложения спектральных составляющих и децимация. На выходе блока суммарно-разностной обработки формируются сигналы суммарного и разностного каналов обработки.

Цифровой фильтр сжатия (ЦФС) обеспечивает внутрипериодную обработку парциальных импульсов в соответствии с полученной из оперативно-запоминающего устройства частотной характеристикой фильтра.

Выходное БПФ заданной размерности вычисляет огибающую сжатых широкополосных сигналов в пределах окна наблюдаемых дальностей, ограниченного величиной, обратно пропорциональной величине скачка частоты. С выхода БПФ суммарного канала сигнал подается на цифровой квадратичный детектор (ЦКД), где формируется амплитудная огибающая дальностного радиолокационного портрета (ДРЛП) Z_i . Выходной сигнал БПФ разностного канала подается на угловой дискриминатор (УД β), обеспечивающий определение угловой координаты блестящих точек (БТ) цели с последующим пересчетом в картинную плоскость ΔL_{β_i} . На второй вход УД поступает выходной сигнал ЦКД, позволяющий стабилизировать крутизну дискриминационной характеристики измерителя угловых координат.

Рассматриваемый вариант структуры широкополосного моноимпульсного радиолокатора сопровождения (ШМРС) позволяет при высоком разрешении по дальности и

значительном отношении сигнал шум уменьшить влияние координатного шума цели.

3. Повышение точности измерения координат кажущегося центра радиолокационной цели в зенитном пушечно-ракетном комплексе

В разделе 2 рассмотрен вариант структуры ШМРС, позволяющей разрешать отдельные БТ по дальности с последующим измерением их угловых координат. В таком случае координаты кажущегося центра могут определяться любой разрешенной БТ. Попадание в один элемент разрешения по дальности нескольких локальных отражателей приведет к блужданию координат протяженного объекта как по дальности, так и по углам. Кроме того, при движении цели БТ могут перемещаться в другие элементы дальности, либо затеняться при различных угловых положениях относительно станции сопровождения. Поэтому выбор одного локального отражателя в качестве кажущегося центра объекта является нецелесообразным.

В соответствии с [11] и [12] наиболее точным алгоритмом определения угловых координат (азимут и угол места) и дальности кажущегося центра цели $\hat{\alpha}_{\text{кц}}$ является:

$$\hat{\alpha}_{\text{кц}} = \frac{\sum_{i=i_0-N}^{i_0+N} \hat{\alpha}_i Z_i}{\sum_{i=i_0-N}^{i_0+N} Z_i}, \quad (5)$$

где $\hat{\alpha}_i$ и Z_i – оценка измеряемой координаты (дальности и азимута) и значение квадрата модуля амплитудной огибающей ДРЛП в i -м элементе дальности, соответственно; $2N$ – размер окна дальности, в котором осуществляется оценка координат; i_0 – номер дискрета дальности, соответствующего максимуму огибающей принятого сигнала.

В соответствии с (5) взвешенное суммирование оценок координат БТ $\hat{\alpha}_i$ позволяет уменьшить блуждание кажущегося центра объекта как внутри элемента дальности (при попадании нескольких локальных отражателей), так и между ними.

Проведем пример расчета СКО оценки дальности $\sigma_{\hat{r}_{\text{кц}}}$ и азимута в картинной плоскости $\sigma_{\hat{\beta}_{\text{кц}}}$ кажущегося центра объекта станцией сопровождения ЗПРК «Тунгуска» и предлагаемым вариантом ШМРС (рис. 3). В качестве цели используется математическая модель истребителя F-15, разработанная в пакете программ RTBS [13], находящегося на дальности $r_{\text{ц}} = 1000$ м при различных ракурсах наблюдения ($\varphi = 0 \dots 90$ град. с дискретностью в 1 град.). В соответствии с параметрами станции сопровождения ЗПРК «Тунгуска» отношение сигнал шум на входе устройства внутривычислительной обработки для различных ракурсов наблюдения изменяется в пределах $\gamma = 75 - 90$ дБ. СКО оценивалось по результатам $N_{\text{оп}} = 500$ опытов. В данном расчете времена наблюдения $T_{\text{н}}$ и обращения $T_{\text{об}}$ к цели равны ($T_{\text{об}}/T_{\text{н}} = 1$). В качестве зондирующего сигнала используется когерентная последовательность линейных частотно-манипулированных радиоимпульсов. При этом разрешающая способность ЗПРК «Тунгуска» по дальности составляет $\Delta r = 75$ м ($\Delta f_{\text{м}} = 2$ МГц) [5]. Для ШМРС разрешение по дальности $\Delta r_{\text{АМП}} = 0.5$ м ($\Delta f_{\text{м}} = 300$ МГц). Азимутальное разрешение в обоих случаях составляет $\Delta \beta = 2$ град [5]. При этом предполагалось, что динамические ошибки измерения координат объекта скомпенсированы полностью.

На рис. 4, а представлен пример расчета СКО оценки радиальной дальности $\sigma_{\hat{r}_{\text{кц}}}$ кажущегося центра цели станцией сопровождения ЗПРК «Тунгуска» ($\sigma_{\hat{r}_{\text{кц,зпрк}}}$) и ШМРС ($\sigma_{\hat{r}_{\text{кц,мр}}}$) (в соответствии с алгоритмом (5)).

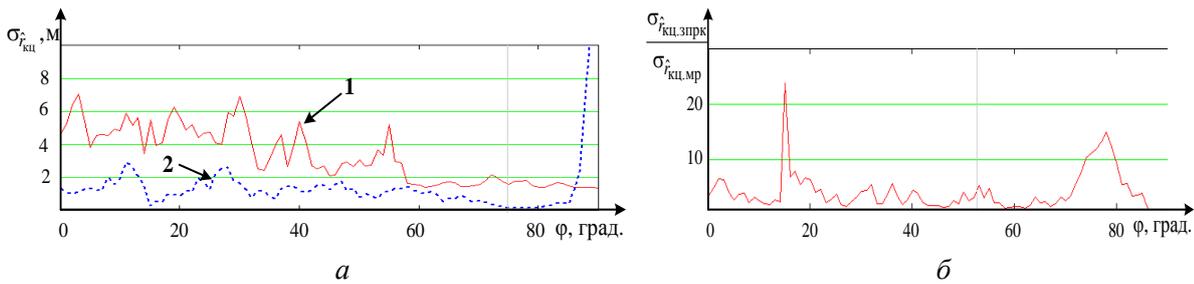


Рис. 4. Зависимость $\sigma_{\hat{r}_{кц}}$ кажущегося центра цели (а) и отношения $\sigma_{\hat{r}_{кц,зпрк}} / \sigma_{\hat{r}_{кц,мр}}$ (б) от ракурса наблюдения, измеренных: 1 – станцией сопровождения целей ЗПРК; 2 – широкополосным моноимпульсным радиолокатором сопровождения

Из рис. 4, а следует, что при изменении ракурса сопровождаемой цели от 0 до 90 градусов, СКО оценки дальности до ее кажущегося центра в ЗРПК «Тунгуска» изменяется от 1,2 до 7 м. Падение СКО с увеличением ракурса вызвано уменьшением радиального размера цели и соответствующим снижением шума дальности. Резкие скачки оценки координаты кажущегося центра вызваны взаимными затенениями БТ цели в используемой модели RTBS при различных ракурсах наблюдения. В ШМРС ошибка оценки радиальной дальности кажущегося центра для всех ракурсов наблюдения изменяется от 0,1 до 2,5 м. Для ракурса $\varphi \approx 90$ град. наблюдается скачок СКО оценки радиальной дальности за счет резкого увеличения эффективной отражающей поверхности цели и роста боковых остатков отклика согласованного фильтра. Зависимость отношения ошибок оценки дальности кажущегося центра радиолокаторов $\sigma_{\hat{r}_{кц,зпрк}} / \sigma_{\hat{r}_{кц,мр}}$ для различных ракурсов наблюдения представлена на рис. 4, б (выигрыш в точности измерений от 1,2 до 30 раз).

На рис. 5, а представлен пример расчета СКО оценки поперечной координаты (азимута в картинной плоскости) кажущегося центра цели станцией сопровождения ЗПРК «Тунгуска» ($\sigma_{\hat{\beta}_{кц,зпрк}}$) и ШМРС ($\sigma_{\hat{\beta}_{кц,мр}}$). При моделировании измерителя угловой координаты станции сопровождения ЗПРК предполагалось, что азимут центра объекта измеряется в элементе дальности, в котором принято решение об обнаружении максимального отсчета i_0 . Измерение в ШМРС осуществлялось в соответствии с рассматриваемым алгоритмом (5).

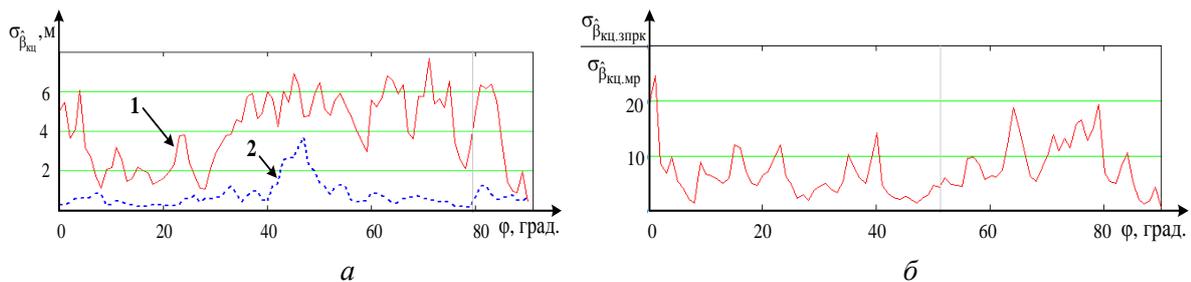


Рис. 5. Зависимость $\sigma_{\hat{\beta}_{кц}}$ кажущегося центра цели (а) и отношения $\sigma_{\hat{\beta}_{кц,зпрк}} / \sigma_{\hat{\beta}_{кц,мр}}$ (б) от ракурса наблюдения, измеренных: 1 – станцией сопровождения целей ЗПРК; 2 – широкополосным моноимпульсным радиолокатором сопровождения

Для станции сопровождения ЗПРК «Тунгуска» (рис. 5, а) наблюдаются отклонения СКО оценки поперечной координаты кажущегося центра цели от 1 до 8 м, вызванных взаимным затенением БТ цели. В ШМРС СКО оценки поперечной координаты кажущегося центра цели изменяется от 0,1 до 1 м. Зависимость отношения ошибок оценки поперечной координаты кажущегося центра радиолокаторов $\sigma_{\hat{\beta}_{кц,зпрк}} / \sigma_{\hat{\beta}_{кц,мр}}$ для различных ракурсов наблюдения представлена на рис. 5, б (выигрыш в точности измерений от 2 до 30 раз).

Заклучение

На небольших дальностях (единицы километров) флюктуации суммарного отраженного сигнала по амплитуде, дальности и по углам (азимут и угол места) вызывают блуждание кажущегося центра протяженной радиолокационной цели. Применительно к ЗПК, наличие данных шумов (дальностного и угловых) приводит к снижению точности наведения зенитных автоматов в направлении сопровождаемого объекта.

Представленный вариант структуры ШМРС, позволяет при высокой разрешающей способности по радиальной дальности, значительном отношении сигнал шум и дальности пушечной стрельбы (для ЗПК Тунгуска от 0,2 до 4 км) уменьшить ошибку оценки не только радиальной дальности (от 1,2 до 30 раз), но и поперечной координаты (азимута в картинной плоскости) (от 2 до 30 раз).

INCREASE OF RADAR-TRACKING SEEMING CENTRE COORDINATES MEASUREMENT ACCURACY IN ANTI-AIRCRAFT GUN-MISSILE COMPLEX

E.N. BUILOU, S.A. GORSHKOV

Abstract

The analysis of features of influence range and angular noise of the purpose on accuracy of measurement of co-ordinates in antiaircraft pushechno-rocket complexes is carried out. The way of increase of accuracy of measurement of co-ordinates of the seeming centre of radar-tracking object in a broadband monopulse radar of support is considered.

Keywords: anti-aircraft gun-missile complex, seeming centre, broadband monopulse radar of support.

Список литературы

1. *Фельдман Ю.И., Мандуровский И.А.* Теория флюктуаций локационных сигналов, отраженных распределенными целями. М., 1988.
2. Радиоэлектронные системы: основы построения и теория. Справочник. / Под ред. Я.Д. Ширмана. М., 2007.
3. *Бартон Д.* Радиолокационные системы. М., 1967.
4. *Островитянов Р.В., Басалов Ф.А.* Статистическая теория радиолокации протяженных целей. М., 1982.
5. *Колодяжный В.В., Рай К.С.* Стрельба, боевая работа и управление огнем подразделений, вооруженных ЗПК 2К22 «Тунгуска». Минск, 2002.
6. *Охрименко А.Е.* Основы извлечения, обработки и передачи информации. Ч. 3. Распознавание-различие сигналов. Минск, 1995.
7. *Охрименко А.Е.* Основы радиолокации и РЭБ. Ч. 1. Основы радиолокации. М., 1983.
8. *Ширман Я.Д., Манжос В.Н.* Теория и техника обработки радиолокационной информации на фоне помех. М., 1981.
9. *Горшков С.А., Буйлов Е.Н.* // Докл. БГУИР. 2013. № 5 (75). С. 79–85.
10. *Горшков С.А., Латушкин В.В., Седышев С.Ю.* Основы радиолокации: Конспект лекций. Ч. 2. Минск, 2004.
11. *Печенин В.В., Мсаллам Е.П.* // Изв. высших учебных заведений. Радиоэлектроника. 2006. Т. 49, № 11. С. 64–72.
12. *Кравченко А.И.* // Авиационно-космическая техника и технология. 2010. № 2 (69). С. 67–71.
13. *Gorshkov S.A., Leshchenko S.P., Orlenko V.M. et. al.* Radar Target Backscattering Simulation: Software and User's Manual. London, 2002.