УДК 621.396.1

Ф.М. Андреев[1], А.В. Статкус[2]

[1]*Харьковский Национальный университет им. В.Н. Каразина, Харьков*
[2]*Харьковский Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», Харьков*

ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ РАДИАЛЬНЫХ СКОРОСТИ И УСКОРЕНИЯ ЦЕЛИ ПО ДАННЫМ СИСТЕМЫ КОГЕРЕНТНОЙ ОБРАБОТКИ РЛС

Предложена аналитическая модель для оценки среднеквадратических ошибок радиальных скорости и ускорения баллистических и космических объектов по результатам когерентной обработки пачечного сигнала. С ее помощью принимается обоснованное решение на включение в состав РЛС системы когерентной обработки пачечного сигнала.

Ключевые слова: *радиолокационная станция надгоризонтного обнаружения, система когерентной обработки, ошибки оценок, радиальная скорость, радиальное ускорение.*

Введение

Высокие по сравнению с аэродинамическими целями скорости движения баллистических и космических объектов (БКО) существенно повышают требования к точности измерения радиальной скорости $R^{(1)}$. Известно [1, С. 14], что даже при прямолинейном движении БКО имеет место ненулевое радиальное ускорение $R^{(2)}$. С одной стороны, оно оказывает влияние на предельную точность измерения $R^{(1)}$ при выполнении условия $R^{(2)} >> \lambda/2T$, где λ – рабочая длина волны РЛС, T – длительность локации цели [2]. С другой стороны, в ряде практических случаев возникает задача высокоточного измерения не только $R^{(1)}$, но и $R^{(2)}$. Например, в мирное время опасность представляет падение на Землю космических аппаратов (станции «Skylab», «Мир», «Фобос-Грунт» и т.п.). В этом случае РЛС надгоризонтного обнаружения (НГО) БКО должна определять с достаточной точностью координаты точек падения (ТП) объектов. Точность определения ТП характеризуется площадью полного эллипса рассеивания ошибок ТП объектов [3]

$$S_{\text{ТП}} = 4\pi\sigma_H \sigma_L , \qquad (1)$$

где σ_H, σ_L – среднеквадратические ошибки (СКО) по боковому отклонению и дальности, характеризуемые поперечной и продольной полуосями эллипса. Параметры траекторий БР и элементы орбит КО связаны дифференциальными уравнениями движения [4]. В качестве таковых выбирают шесть постоянных интегрирования уравнений движения. В местной сферической системе координат такими параметрами являются вектор оценок положения (дальность $\hat{R}$, азимут $\hat{\varepsilon}$, угол места $\hat{\theta}$) и вектор оценок скорости (радиальная скорость $\hat{R}^{(1)}$, азимутальная скорость $\hat{\varepsilon}^{(1)}$, угломестная скорость $\hat{\theta}^{(1)}$) БКО. В работе [3, С. 202, фиг. 26, 27] установлено, что существует линейная связь между σ_H, σ_L и СКО измерения азимута $\sigma_{\hat{\varepsilon}}$, угла места $\sigma_{\hat{\theta}}$ БКО (для угла места, если σ_θ не превосходит 0,17°)

$$\sigma_H = k_H \sigma_{\hat{\varepsilon}} , \quad \sigma_L = k_L \sigma_{\hat{\theta}} , \qquad (2)$$

где k_H, k_L – коэффициенты пропорциональности. В реальном масштабе времени интегрирование уравнений движения всех обнаруженных БКО невозможно [4]. Поэтому определение нужных параметров осуществляется на основе кинематических моделей движения БКО, которые используются при сглаживании (фильтрации) измерений координат. При этом интервалы сглаживания выбираются такими, что влиянием динамической ошибки можно пренебречь.

В работе [4, С. 199] установлена возможность уточнения оценок азимутальной $\hat{\varepsilon}^{(1)}$ и угломестной $\hat{\theta}^{(1)}$ скоростей по результатам дополнительных независимых высокоточных измерений $R^{(2)}$. Известно, что наличие независимых измерений скоростей изменения координат повышает точность оценок самих координат при сглаживании n

результатов измерений [5]. Можно показать, что уменьшение площади эллипса ошибок ТП при $n \to \infty$ составляет 2 раза.

Для определения действительного значения уменьшения площади эллипса ошибок ТП при конкретном значении n требуется знание оценки дисперсии высокоточного измерения $R^{(2)}$. В настоящее время она в известной литературе отсутствует. Наличие такой информации позволяет оценить не только точность измерения координат ТП, но и качество выполнения других задач, решаемых РЛС БКО, например, предварительной классификации типов траекторий целей и обнаружения небаллистического участка траектории цели.

Анализ результатов известных исследований. Аналоговая система для измерения $R^{(1)}, R^{(2)}$ рассмотрена в работе [6]. В работе [7] приведена полная корреляционная матрица ошибок оценок R, $R^{(1)}$ и $R^{(2)}$ для одиночного импульсного сигнала. Показано, что высокоточные измерения $R^{(1)}$, $R^{(2)}$ могут быть обеспечены лишь при большой длительности зондирующего сигнала, что существенно ухудшает точность измерения дальности R. В работе [8] впервые сказано, что наилучшим зондирующим сигналом, обеспечивающим высокоточные измерения $R^{(1)}$ и $R^{(2)}$, является когерентная пачка зондирующих сигналов. Показано, что при совмещении момента измерения с центром пачки обеспечивается наивысшая точность фазовых измерений $R^{(1)}$ и $R^{(2)}$ для фиксированных длительности сигнала, стабильности генератора и точности единичного замера фазы. Детально функция рассогласования в координатах $R^{(1)}$ и $R^{(2)}$ рассмотрена в работе [9]. Независимость совместных оценок $R^{(1)}$ и $R^{(2)}$ при совмещении момента измерения с центром пачки установлена в [10]. Там же обоснована протяженность области анализа по $R^{(2)}$. Оценка шумовой составляющей ошибок $R^{(1)}$ и $R^{(2)}$ выполнена в [11]. Но ни в одной из перечисленных работ нет выражений для расчета результирующих ошибок измерения $R^{(1)}$, $R^{(2)}$ для зондирующего сигнала в виде когерентной пачки импульсов.

Цель статьи: оценка результирующей точности измерения радиальных скорости и ускорения цели по данным системы когерентной обработки РЛС.

Материал статьи организован следующим образом. В разделе 1 формулируется постановка задачи. В разделе 2 приводится краткое описание системы когерентной обработки пачечного сигнала (СКОПС). В разделах 3 … 6 систематически развивается аналитическая модель точностных характеристик оценок радиальных скорости и ускорения цели по данным СКОПС. В разделе 7 в качестве примера использования разработанной модели в РЛС НГО анализируется степень уточнения координат точки падения, доставляемая СКОПС конкретного типа РЛС НГО. В заключение статьи в разделе 8 формулируются выводы относительно решенной задачи и рекомендации по использованию модели.

Основной материал

1. Постановка задачи. Помимо шумовой составляющей суммарная ошибка измерений $R^{(1)}$, $R^{(2)}$ содержит аппаратурные ошибки за счет дискретности отсчетов и несовершенства аппаратуры, а так же ошибки распространения, вызванные случайными изменениями параметров среды. Если для R значения этих составляющих можно найти в литературе [12-14], то этого нельзя сказать о $R^{(1)}$, $R^{(2)}$. Поэтому актуальной является задача определения суммарных ошибок измерения $R^{(1)}, R^{(2)}$ по когерентной пачке импульсов. Наличие этой информации позволит определить значение уменьшения B размера эллипса ошибок ТП и принять решение (при B > 1,25…1,3) на включение в состав РЛС системы когерентной обработки пачечного сигнала (СКОПС). Значимость решения поставленной задачи подчеркивает тот факт, что номенклатура РЛС НГО БКО постоянно расширяется: метровая RIAS (Франция, 1994 г.), дециметровая Волга (РФ, 2002г.), метровые GRAVES (Франция, 2005 г.), Воронеж-М (РФ, 2006 г.), сантиметровая AN/TPY-2 (США, 2006-09 гг.) [15], дециметровая Воронеж-ДМ (РФ, 2009 г.), сантиметровые МАРС и МАРС-Э (РФ, в разработке) [16].

2. Характеристика системы когерентной обработки пачечного сигнала. Аппаратурная часть СКОПС решает задачи приема, усиления, согласованной фильтрации сигналов, измерения фазы сигналов и оцифровывания результатов измерений фазы (внутрипериодной обработки). Межпериодная обработка оцифрованных отсчетов фазы пачечного сигнала осуществляется алгоритмами, программно реализованными на ЭВМ РЛС.

Структурная схема аналого-цифровой, или гибридной СКОПС изображена на рис. 1. Для получения оценок $R^{(1)}$, $R^{(2)}$ используются замеры фаз $\Delta\psi_i$ ($i = \overline{1, N}$) сигнала, N – число импульсов в пачке. После двойного преобразования в приемниках высокой (ВЧ) и низкой частот (НЧ) импульсы на второй промежуточной частоте $f_{ПР2}$ поступают на вход фазометра, где в каждом такте измеряются разности фаз зондирующего (ЗС) $\Delta\cdot_{ЗС\,i}$ и эхо-сигнала (ЭС) $\Delta\cdot_{ЭС\,i}$ на частоте $f_{ПР2}$ относительно колебаний эталонного генератора с частотой $f_{ЭГ}$, выдаваемые в двоичном коде. Колебания гетеродинов 1 и 2, эталонного и задающего генераторов вырабатываются методом косвенного когерентного синтеза частот [17]. При этом когерентная сетка частот формируется путем соответствующего деления и умножения высокостабильного колебания опорного генератора. Моменты измерений фазы ИЗФ1 в конце ЗС $\tau_{И}$ и ИЗФ2 в конце ЭС Δt_i задаются ЭВМ по информации о текущих параметрах траектории цели, полученных на этапах ее обнаружения и сопровождения. Измерения проводятся 2 раза для обеспечения когерентности ЭС пачки. Компенсация фазовых ошибок передающего и приемного трактов осуществляется вычитанием из относительной фазы ЭС относительной фазы ЗС в реверсивном счетчике фазометра. Результирующая фаза замера в *i*-ом такте зондирования равна

$$\Delta\psi_i = \Delta\psi_{ЭС\,i} - \Delta\psi_{ЗС\,i} = \\ = \left(\omega_{ЭГ} - \omega_{Г2} + \omega_{Г1}\right)\cdot \Delta t_i = \omega_{Н}\cdot \Delta t_i\ , \qquad (3)$$

где $\omega_{ЭГ}, \omega_{Г1}, \omega_{Г2}, \omega_{Н}$ – угловые частоты эталонного генератора, гетеродинов и несущая частота соответственно; Δt_i - время между моментами излучения и приема сигнала в i-м такте обработки. Результирующая фаза единичных замеров $\Delta\psi_i$ не зависит от случайных

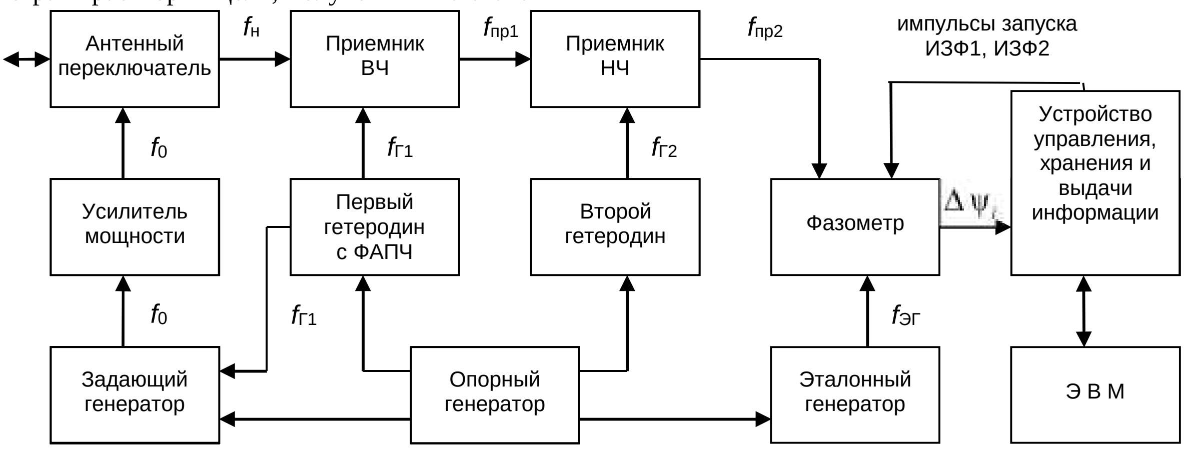

Рис. 1. Структурная схема гибридной СКОПС

фаз элементов передатчика и приемника РЛС, а зависит только от искомых параметров $R^{(1)}, R^{(2)}$, нестабильностей частот $\omega_{ЭГ}, \omega_{Г1}, \omega_{Г2}$ и ошибок измерения фаз в моменты времени ИЗФ1, ИЗФ2. Так как входная реализация есть нелинейная функция времени, то оценки $\hat{R}^{(1)}, \hat{R}^{(2)}$ могут быть найдены лишь путем корреляционной обработки дискретной реализации из N единичных замеров фаз когерентной пачки сигналов $\Delta\Psi = \left\{\Delta\psi_i\right\}_1^N$. В соответствующем алгоритме реализация фазы $\Delta\Psi$ сравнивается с набором опорных функций – гипотез $\psi_{ОП}\left(R_m^{(1)}, R_n^{(2)}\right)$, где m, n – номера гипотез по $R^{(1)}$ и $R^{(2)}$. За оценки $R^{(1)}, R^{(2)}$ принимаются значения гипотез, при которых достигается максимум корреляционной функции. Кроме того, алгоритм снижает ошибки дискретности и устраняет неоднозначность результатов измерения фазы.

3. Оценка шумовой составляющей ошибок $R^{(1)}$ и $R^{(2)}$. Для пачки из N импульсов дисперсии шумовых ошибок оценок $R^{(1)}$ и $R^{(2)}$ равны [11]

$$\sigma_{1П}^2 = \left(\frac{\lambda}{2\pi}\right)^2 \frac{12L}{N(N-1)^2 q_0^2 T_{СЛ}^2},$$

$$\sigma_{2П}^2 = \left(\frac{\lambda}{2\pi}\right)^2 \frac{180L}{N(N-1)^4 q_0^2 T_{СЛ}^4}, \qquad (4)$$

где q_0^2 – отношение сигнал/шум на входе СКОПС, $T_{СЛ}$ – период следования ЗС, L – потери из-за неоптимальности трактов обработки сигналов (L = 3,75 и 1,25 для гибридной и цифровой СКОПС соответственно).

4. Оценка аппаратурных ошибок. Фазовыми ошибками за счет нестабильности $f_{ЭГ}$ в виду их малости по сравнению с ошибками за счет гетеродина 2 можно пренебречь. Ошибки фазы за счет охваченного кольцом фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ) гетеродина 1 являются флюктуационными. Их можно считать нормальными центрированными с дисперсией $\sigma_1^2 = \left(q_1^2\right)^{-1}$, где q_1^2 – отношение сигнал/шум по мощности во входном сигнале ФАПЧ [18, С.283, (5.4.36)]. Для гетеродинов данного вида типовое значение $q_1^2 \approx -60$ дБ [18], т.е. $\sigma_1^2 \cong 10^{-6}$ рад^2. Дисперсия ошибки фазометра в моменты времени ИЗФ1, ИЗФ2 равна [17]

$$\sigma^2_{ИЗМ\,1} = \sigma^2_{ИЗМ\,2} = = \sum_{j=1}^{3}\left(\Delta\psi_j/3\right)^2 + \Delta\psi_Д^2/12, \qquad (5)$$

где $\left\{\Delta\psi_j,\ j = 1...3\right\}$ – максимальные ошибки из-за нелинейности кодовой, неравномерности фазо-амплитудной и фазо-частотной характеристик фазометра, $\Delta\psi_Д$ – величина дискреты фазометра, или кодовой единицы отсчета фазы (1к.е.). При $n = 9$ -разрядном коде 1к.е. = =360°/$\left(2^n - 1\right) \approx$ 0,7°. Ошибки из-за нелинейности и неравномерности характеристик фазометра составляют ±3, ±4 и ±4 к.е. соответственно [17]. Подстановка этих значений в (5) дает

$\sigma^2_{ИЗМ1} = 5{,}00847[\text{к.е.}^2] = 7{,}5722\times10^{-4}[\text{рад}^2]$.

Суммарная дисперсия флюктуационной аппаратурной ошибки отсчета фазы $\sigma^2_{ФАО1}$ гибридной СКОПС в i-ом такте зондирования составляет

$\sigma^2_{ФАО1} \cong 2\sigma^2_{ИЗМ1} = 1{,}51543\times10^{-3}[\text{рад}^2]$. В составе цифровой СКОПС фазометр отсутствует. В этом случае в приемнике НЧ (или ВЧ) с помощью АЦП оцифровываются квадратурные составляющие I_{Ci} и I_{Si} каждого i-го импульса. Его фаза определяется как $\cdot_i = \operatorname{arctg}\left(I_{Si}/I_{Ci}\right)$. Суммарная дисперсия флюктуационной аппаратурной ошибки отсчета фазы ЦСКО в i-ом такте $\sigma^2_{ФАО2} \approx 2\sigma^2_{ИЗМ1} = 1{,}5\times10^{-4}[\text{рад}^2]$, то есть на порядок меньше, чем в случае гибридной СКОПС.

Для определения флюктуационных аппаратурных ошибок оценок радиальных скорости $\sigma^2_{1ФАО\,j}$ и ускорения $\sigma^2_{2ФАО\,j}$ (j=1 – гибридная СКОПС; j = 2 – цифровая СКОПС) используем методику на основе квазимоментов длительности пачки сигналов [13, С.168]. Для прямоугольной пачки длительностью $T_Н = (N-1)T_{СЛ}$ получаем

$$\sigma^2_{1ФАО\,j} = \left(\frac{\lambda}{2\pi}\right)^2 \frac{12}{(N-1)^2 T^2_{СЛ}}\sigma^2_{ФАО\,j},$$

$$\sigma^2_{2ФАО\,j} = \left(\frac{\lambda}{2\pi}\right)^2 \frac{180}{(N-1)^4 T^4_{СЛ}}\sigma^2_{ФАО\,j}. \qquad (6)$$

В качестве гетеродинов 1 и 2 в когерентных РЛС должны использоваться генераторы с относительной нестабильностью колебаний не хуже 10^{-6}-10^{-7} [20]. Таким требованиям отвечает, например, кварцевый генератор с термостатированием пьезоэлемента. Его аппаратурная погрешность является медленно меняющейся ошибкой (ММО). Кратковременная относительная нестабильность частоты кварцевого гетеродина 2 равна $\delta f_{Г2} = 5\cdot10^{-8}$ [19, С.132]. Тогда при $f_{Г2}$ = 16 МГц абсолютная нестабильность частоты гетеродина 2 равна $\Delta f_{Г2} = f_{Г2}\cdot\delta f_{Г2} = \pm0{,}8$ Гц. В пределах интервала наблюдения $T_Н$ ошибку $\Delta f_{Г2}$ можно трактовать как тональную фазовую модуляцию (ФМ) колебаний гетеродина 2 с периодом $T_{МОД} > 2T_Н$ [20]. Опыт эксплуатации приемников когерентных РЛС показывает, что модель паразитной тональной ФМ с девиацией $\Phi_М$

$$\Delta\varphi(t) = \Phi_М\cos\left(2\pi t/T_{МОД} + ¶_М\right), \qquad (7)$$

где $¶_М$ – начальная фаза паразитной ФМ, удовлетворительно описывает нестабильность гетеродина 2 при $T_{МОД} \approx 5$ с [16]. Следствием паразитной ФМ является фазовое рассогласование сигналов $\Delta\psi_{Г2}$, в первом приближении представляющее собой аппаратурную ММО фазовых измерений. На концах пачки длительностью $T_Н$ при привязке момента измерений к ее центру ММО фазовых измерений $\Delta\psi_{Г2}$ достигает значения [20, С.152]

$$\Delta\psi_{Г2} = \pi^3\,\Delta f_{Г2}\Delta t_i\left(T_Н/T_{МОД}\right)^2. \qquad (8)$$

Величина $\Delta\psi_{Г2}$ порождает смешение по каждому из оцениваемых параметров

$$\Delta R^{(1)}_{РАСС} = \left(\lambda/2\pi\right)\Delta\psi_{Г2}/T_Н,$$

$$\Delta R^{(2)}_{РАСС} = \left(2\lambda/\pi\right)\Delta\psi_{Г2}/T^2_Н \qquad (9)$$

относительно истинных значений. Анализ фазовой ММО показал, что (9) определяет максимальное значение смещения. Его текущее значение по данной пачке определяется фазой $\theta_{\text{АМ}0}$ паразитной ФМ в центре пачки

$$\theta_{\text{АМ}0} = 2\pi\left(t_0 + \Delta t_0/2\right)/T_{\text{МОД}} + ¶_{\text{М}},$$

где за Δt_0 принимается Δt_i при $i = 0$. При этом текущие значения смещения составляют

$$\Delta R^{(1)}_{\text{РАСС}} = \left(\lambda/2\pi\right)\Delta\psi_{\text{Г}2}\sin\theta_{\text{АМ}0}/T_{\text{Н}},$$

$$\Delta R^{(2)}_{\text{РАСС}} = \left(2\lambda/\pi\right)\Delta\psi_{\text{Г}2}\cos\theta_{\text{АМ}0}/T^2_{\text{Н}}. \quad (10)$$

В серии оценок $R^{(1)}$ и $R^{(2)}$ угол $\theta_{\text{АМ}0}$ случаен. Полагая его распределение равномерным на интервале $[0,\ 2\pi]$, находим средние $m_{1\text{М}}$ и $m_{2\text{М}}$ абсолютных значений величин (10)

$$m_{1\text{М}} = M\left\{\left|\Delta R^{(1)}_{\text{РАСС}}\left(\theta_{\text{АМ}0}\right)\right|\right\} =$$

$$= \left(\lambda/\pi^2\right)\Delta\psi_{\text{Г}2}/T_{\text{Н}} = \pi\lambda\Delta f_{\text{Г}2}\Delta t_i T_{\text{Н}}/T^2_{\text{МОД}}, \quad (11)$$

$$m_{2\text{М}} = M\left\{\left|\Delta R^{(2)}_{\text{РАСС}}\left(\theta_{\text{АМ}0}\right)\right|\right\} =$$

$$= \left(4\lambda/\pi^2\right)\Delta\psi_{\text{Г}2}/T^2_{\text{Н}} = 4\pi\lambda\Delta f_{\text{Г}2}\Delta t_i/T^2_{\text{МОД}}. \quad (12)$$

5. Оценка ошибок, обусловленных средой распространения радиоволн. Для метрового и нижней части дециметрового диапазонов волн на трассах сверхдальнего распространения определяющими являются ошибки распространения за счет ионосферы [14]. Величина ионосферной ошибки измерения радиальной скорости $\Delta R^{(1)}_{\text{ИОН}}$ определяется только тангенциальной составляющей вектора скорости $\mathbf{V}$ цели [14, С. 337]. Фазовая ионосферная ошибка отсчета является постоянным от отсчета к отсчету смещением. Можно показать, что выражения для оценок $\Delta\hat{R}^{(n)}_{\text{ИОН}}$ линейно зависят от их значений $R^{(n)}_0 = R^{(n)}(t_0)$, $n = 1, 2$, при привязке измерений к центру пачки t_0

$$m_{1\text{ИОН}} \approx -K_{\text{НКР}}R_0^{(1)}\Delta\alpha_r\,\mu_{\text{ИОН}}\sin^{\eta}\psi_V,$$

$$m_{2\text{ИОН}} \approx -K_{\text{НКР}}R_0^{(2)}\Delta\alpha_r\,\mu_{\text{ИОН}}\sin^{\eta}\psi_V, \quad (13)$$

где $\Delta\alpha_r$, ψ_V – углы между фактической траекторией луча и прямым лучом и между вектором скорости цели и прямым лучом соответственно в месте расположения цели в данный момент времени, $\mu_{\text{ИОН}} = \left(\Delta R^{(1)}_{\text{ИОН}}\right)_{\text{МАКС}} / \left(R^{(1)}\right)_{\text{МАКС}}\left(\Delta\alpha_r\right)_{\text{МАКС}}$, $\eta \approx 10^{-3}/\Delta\alpha_r$. В пределах зоны обзора РЛС НГО по углу места имеем $\Delta\alpha_r \in [0{,}3;\ 2]$ мрад и значение параметра $\mu_{\text{ИОН}} \approx 0{,}5$ при $\left(R^{(1)}\right)_{\text{МАКС}} \approx 10^4$ м / с. Для средних широт максимальные абсолютные значения смещений не превосходят десятых долей процента $R^{(1)}$ и $R^{(2)}$ и при максимальных значениях последних достигают 3 м/с и 0,3 м/с^2 соответственно. Возможные в РЛС НГО измерения параметров ионосферы методом некогерентного рассеяния (НКР) позволяют частично скомпенсировать $\Delta R^{(1)}_{\text{ИОН}}$, что учтено в (13) коэффициентом $K_{\text{НКР}}$ = [0,07;1].

6. Определение результирующих ошибок оценок $R^{(1)}$, $R^{(2)}$ цели. С учетом сделанных выше допущений дисперсии флюктуационных ошибок оценок $R^{(1)}$, $R^{(2)}$ цели $\sigma^2_{\Sigma1}$ и $\sigma^2_{\Sigma1}$ равны суммам дисперсий шумовой (4) и аппаратурной (6) флюктуационных составляющих

$$\sigma^2_{\Sigma1} = \left(\frac{\lambda}{2\pi}\right)^2 \frac{12}{(N-1)^2 T^2_{\text{СЛ}}}\left[\frac{L}{Nq_0^2} + \sigma^2_{\text{ФАО}\,j}\right],$$

$$\sigma^2_{\Sigma2} = \left(\frac{\lambda}{2\pi}\right)^2 \frac{180}{(N-1)^4 T^4_{\text{СЛ}}}\left[\frac{L}{Nq_0^2} + \sigma^2_{\text{ФАО}\,j}\right]. \quad (14)$$

Из теории ошибок измерений известно, что когда число составляющих ММО не более трех, в качестве результирующей ошибки берется сумма модулей составляющих [21, С.123]. Следовательно, результирующие значения ММО оценок $R^{(1)}$, $R^{(2)}$ цели Δ_1 и Δ_2 по данным СКОПС равняются суммам

$$\Delta_1 = \left|m_{1\text{М}}\right| + \left|m_{1\text{ИОН}}\right| \approx$$

$$\approx \left|\left(\lambda/\pi^2\right)\Delta\psi_{\text{Г}2}/T_{\text{Н}}\right| +$$

$$+ \left|K_{\text{НКР}}R_0^{(1)}\Delta\alpha_r\mu_{\text{ИОН}}\sin^{\eta}\psi_V\right|, \quad (15)$$

$$\Delta_2 = \left|m_{2\text{М}}\right| + \left|m_{2\text{ИОН}}\right| \approx$$

$$\approx \left|\left(4\lambda/\pi^2\right)\Delta\psi_{\text{Г}2}/T^2_{\text{Н}}\right| +$$

$$+ \left|K_{\text{НКР}}R_0^{(2)}\Delta\alpha_r\mu_{\text{ИОН}}\sin^{\eta}\psi_V\right|.$$

Выражения (15) характеризуют смещения результирующих ошибок оценок $R^{(1)}$, $R^{(2)}$ цели по данным СКОПС. Поэтому окончательно точность оценок радиальных параметров цели определяется их среднеквадратическими ошибками [22, С. 438, (4.3.8)]

$$£_1 = \sqrt{\sigma^2_{\Sigma1} + \Delta_1^2},\ £_2 = \sqrt{\sigma^2_{\Sigma2} + \Delta_2^2}, \quad (16)$$

где слагаемые задаются выражениями (14) и (15) соответственно. Адекватность аналитической модели (14)…(16) подтверждена результатами имитационного моделирования, проведенного авторами [23]. Точностные характеристики гибридной СКОПС (числитель) и цифровой СКОПС (знаменатель), рассчитанные по выражениям (14)…(16) при $q_0^2 = 100$, приведены в таблицах 1 и 2 для $K_{\text{НКР}} = 1$ и $K_{\text{НКР}} = 0{,}1$ соответственно.

7. Пример использования модели точностных характеристик СКОПС. Наиболее востребованы высокоточные измерения $R^{(1)}$, $R^{(2)}$ в РЛС НГО метрового диапазона. В качестве примера рассматриваем РЛС «Днепр-М» (Украина, РФ): $\sigma_R = 330$ м; $T_0 =$ 2,62 с; $n_{\min} =$ 10; $n_{\max} =$ 22. Согласно табл. 1 имеем $\pm_{\hat{R}_K^{(2)}} \le$ 0,8 м / с². В случае цели, летящей на РЛС, степень уточнения угломестной скорости $\hat{\theta}^{(1)}$ определяется отношением

$$P = \sigma^2_{\hat{\theta}^{(1)}} \Big/ \left[\sigma^2_{\hat{\theta}^{(1)}}\right]_{R^{(2)}} \approx \sigma^2_{\hat{R}_C^{(2)}} \Big/ \sigma^2_{\hat{R}_K^{(2)}}, \qquad (17)$$

где $\pm^2_{\hat{\theta}^{(1)}}$, $\left[\pm^2_{\hat{\theta}^{(1)}}\right]_{R^{(2)}}$ – дисперсии оценок $\hat{\theta}^{(1)}$ при отсутствии и наличии независимых когерентных измерений $R^{(2)}$, $\pm^2_{\hat{R}_C^{(2)}}, \pm^2_{\hat{R}_K^{(2)}}$ – дисперсии оценок $R^{(2)}$ по данным сглаживания измерений дальности R цели и отдельных когерентных измерений $R^{(2)}$ по данным СКОПС соответственно. Необходимое для расчета P значение среднеквадратического отклонения (СКО) $R^{(2)}$ по результатам сглаживания $\pm_{R_C^{(2)}}$ описывается выражением [5, С. 308, (4.68)]

$$\pm_{R_C^{(2)}} = \frac{12\sqrt{5}\,\pm_R}{T_0^2\sqrt{n\left(n^2-1\right)\left(n^2-4\right)}}. \qquad (18)$$

Степень уменьшения СКО измерения угловой координаты по результатам сглаживания составляет:

$$B = \frac{1+12c\Big/\left(n^2-1\right)}{\sqrt{1+6c\left(5n-1\right)\Big/\left(n+1\right)\left(2n-1\right)\left(n-1\right)+72c^2\Big/\left(n+1\right)\left(2n-1\right)\left(n-1\right)^2}}, \qquad (19)$$

где

$$c = P\cdot\sigma_y^2\Big/\left(T_0^2\sigma^2_{y^{(1)}}\right) = P\cdot n\cdot\left(n^2-1\right)\Big/\left(12T_0^2\right).$$

Подставляя данные в (17)…(19), имеем $B_{n=10} \ge 1{,}82$; $B_{n=22} \ge 1{,}56$. Эти цифры хорошо согласуются с результатами многолетней эксплуатации РЛС «Днепр-М» и проведенного авторами имитационного моделирования, что подтверждает эффективность использования гибридной СКОПС в составе РЛС этого типа.

Таблица 1

Точностные характеристики когерентных измерений $R^{(1)}$ и $R^{(2)}$
без компенсации ионосферных ошибок

$\sigma_{\Sigma 1}$, м/с*	$\sigma_{\Sigma 2}$, м/с²
Δ_1, м/с	Δ_2, м/с²
ε_1, м/с	ε_2, м/с²

		$K_{\text{НКР}} = 1$					
		$R^{(1)}$, м/с					
ψ_V, рад	$R^{(2)}$, м/с²	180		500		1435	
0	40 … 120	<u>0,1179*</u> 0,0674	<u>0,7432</u> 0,4249	<u>0,1179</u> 0,0674	<u>0,7432</u> 0,4249	<u>0,1179</u> 0,0674	<u>0,7432</u> 0,4249
		<u>0,0047</u> 0,0047	<u>0,0306</u> 0,0306	<u>0,0047</u> 0,0047	<u>0,0306</u> 0,0306	<u>0,0047</u> 0,0047	<u>0,0306</u> 0,0306
		<u>0,1180</u> 0,0676	<u>0,7439</u> 0,4260	<u>0,1180</u> 0,0676	<u>0,7439</u> 0,4260	<u>0,1180</u> 0,0676	<u>0,7439</u> 0,4260
$\frac{\pi}{2}$	40	<u>0,1179</u> 0,0674	<u>0,7432</u> 0,4249	<u>0,1179</u> 0,0674	<u>0,7432</u> 0,4249	<u>0,1179</u> 0,0674	<u>0,7432</u> 0,4249
		<u>0,3647</u> 0,3647	<u>0,1106</u> 0,1106	<u>1,0047</u> 1,0047	<u>0,1106</u> 0,1106	<u>2,8747</u> 2,8747	<u>0,1106</u> 0,1106
		<u>0,3833</u> 0,3709	<u>0,7514</u> 0,4391	<u>1,0116</u> 1,0070	<u>0,7514</u> 0,4391	<u>2,8771</u> 2,8755	<u>0,7514</u> 0,4391
		<u>0,1179</u> 0,0674	<u>0,7432</u> 0,4249	<u>0,1179</u> 0,0674	<u>0,7432</u> 0,4249	<u>0,1179</u> 0,0674	<u>0,7432</u> 0,4249
		<u>0,3647</u>	<u>0,2706</u>	<u>1,0047</u>	<u>0,2706</u>	<u>2,8747</u>	<u>0,2706</u>

	120	0,3647	0,2706	1,0047	0,2706	2,8747	0,2706
		0,3833 / 0,3709	0,7909 / 0,5037	1,0116 / 1,0070	0,7909 / 0,5037	2,8771 / 2,8755	0,7909 / 0,5037

*____ В левом верхнем углу таблицы 1 приведена структура данных для каждой расчетной точки. Соответствующая структура цветом выделена в таблицах 1 и 2: верхняя строка – СКО флюктуационной ошибки, вторая строка – смещение ММО, нижняя строка – результирующая ошибка. Левый столбец – по $R^{(1)}$, правый – по $R^{(2)}$. Числитель – по данным гибридной, знаменатель – по данным цифровой СКОПС

Таблица 2

Точностные характеристики когерентных измерений $R^{(1)}$ и $R^{(2)}$
при компенсации ионосферных ошибок

		$K_{НКР} = 0,1$					
		$R^{(1)}$, м/с					
ψ_V, рад	$R^{(2)}$, м/с²	180		500		1435	
0	40 … 120	0,1179* / 0,0674	0,7432 / 0,4249	0,1179 / 0,0674	0,7432 / 0,4249	0,1179 / 0,0674	0,7432 / 0,4249
		0,0047 / 0,0047	0,0306 / 0,0306	0,0047 / 0,0047	0,0306 / 0,0306	0,0047 / 0,0047	0,0306 / 0,0306
		0,1180 / 0,0676	0,7439 / 0,4260	0,1180 / 0,0676	0,7439 / 0,4260	0,1180 / 0,0676	0,7439 / 0,4260
$\frac{\pi}{2}$	40	0,1179 / 0,0674	0,7432 / 0,4249	0,1179 / 0,0674	0,7432 / 0,4249	0,1179 / 0,0674	0,7432 / 0,4249
		0,0407 / 0,0407	0,0386 / 0,0386	0,1047 / 0,1047	0,0386 / 0,0386	0,2917 / 0,2917	0,0386 / 0,0386
		0,1247 / 0,0787	0,7442 / 0,4267	0,1577 / 0,1245	0,7442 / 0,4267	0,3146 / 0,2994	0,7442 / 0,4267
	120	0,1179 / 0,0674	0,7432 / 0,4249	0,1179 / 0,0674	0,7432 / 0,4249	0,1179 / 0,0674	0,7432 / 0,4249
		0,0407 / 0,0407	0,0546 / 0,0546	0,1047 / 0,1047	0,0546 / 0,0546	0,2917 / 0,2917	0,0546 / 0,0546
		0,1247 / 0,0787	0,7452 / 0,4284	0,1577 / 0,1245	0,7452 / 0,4284	0,3146 / 0,2994	0,7452 / 0,4284

Выводы

Предложена аналитическая модель для оценки результирующих среднеквадратических ошибок совместных измерений радиальных скорости и ускорения по результатам когерентной обработки пачечного сигнала. Разработанная модель учитывает потенциальные ошибки, флюктуационные и медленно изменяющиеся составляющие аппаратурных ошибок, а так же ошибки распространения на трассе зондирования. В соответствии с опытно-теоретическим методом оценки эффективности сложных систем адекватность модели проверена имитационным моделированием в широком диапазоне влияющих факторов. Практическая ценность разработанной модели точностных характеристик СКОПС состоит в ее использовании в качестве универсального инструмента анализа возможности и направлений повышения показателей качества СКОПС РЛС. В настоящей статье полученные с помощью модели оценки позволяют определить степень уменьшения размера эллипса ошибок точек падения и принять обоснованное решение о включении в состав РЛС системы когерентной обработки пачечного сигнала.

Список литературы

1. *Тузов Г. И. Выделение и обработка информации в допплеровских системах. – М.: Сов. радио, 1967. – 256 с.*
2. *Кузьменков В. Ю., Логинов В. А. Анализ влияния учета производных дальности цели при радиолокационных измерениях // Радиотехника, 1998, №7, С. 10 – 15.*
3. *Шапиро И. И. Расчет траекторий баллистических снарядов по данным радиолокационных измерений. – М.: ИЛ, 1961. – 319с.*
4. *Саврасов Ю. С. Алгоритмы и программы в радиолокации. – М.: Радио и связь, 1985. – 216с.*
5. *Кузьмин С.З. Цифровая обработка радиолокационной информации. – М.: Сов. радио, 1967. – 400с.*

6. Kibbler, G.O.T.H. A Radar Pulse Train Optimum Processor for Accelerating Targets.-Trans. IEEE, v.AES – 3 , pp. 808 – 818, September, 1967.

7. Kelly E.J. The Radar Measurement of Range, Velocity and Acceleration. – IEE Trans, v.MIL, pp. 51–57, April,1961.

8. Rihaczek A. W. Radar performance on Targets with range acceleration // IEEE Trans., v.AES – 7, №4. –pp. 711 – 716, 1971.

9. Mitchell R.L. Resolution in Doppler and acceleration with coherent pulse trains // IEEE Trans., v. AES – 7, №4. – pp. 630 – 636, 1971.

10. Статкус А. В. Некоторые аспекты разрешения по радиальным скорости и ускорению при использовании пачек когерентных импульсов // Вестник ХГПУ: Сб. научн. тр./ХГПУ. – Харьков, 1998. – Вып. 10. – С. 62 – 65.

11. Андреев Ф. М., Статкус А. В. Потенциальные возможности корреляционной обработки пачечных когерентных радиолокационных сигналов в координатах первых трех производных дальности цели// Сб. науч. трудов 2-го Международного радиоэлектронного форума «Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития». – Харьков. – Т. 2. – 2005. – С. 147 – 150.

12. Радиоэлектронные системы: основы построения. Справочник / Под ред. Я. Д. Ширмана. – М.: ЗАО «МАКВИС», 1998. – 826 с.

13. Справочник по радиолокации. В 4-х томах. – Т. 1. Пер. с англ. / Под ред. М. Сколника. – М.: Сов. Радио. – 1976. – 455с.

14. Современная радиолокация (анализ, расчет и проектирование систем). Пер. с англ. / Под ред. Кобзарева Ю. Б – М.: Сов. Радио. – 1969. – 704с.

15. http: // www.raytheon.*com*

16. http: // www.rti - *mints.ru / prls.htm*

17. Радиотехнические станции надгоризонтного бнаружения войск ПРН / Учебник под ред. Андреева Ф. М. – Харьков: ВИРТА. – 1983. – 444с.

18. Тихонов В. И., Харисов В. Н. Статистический анализ и синтез радиотехнических устройств и систем / Учебное. пособие для вузов. – М.: Радио и связь. – 1991. – 608с.

19. Альтшуллер Г. В., Елфимов Н. Н., Шакурин Н. Г. Кварцевые генераторы: Справочное пособие. – М.: Радио и связь. – 1984. – 232с.

20. Рейвен С. В. Требования к опорным генераторам для когерентных радиолокационных станций// ТИИЭР. – 1966. – Т. 54. – № 2. – С. 150 – 157.

21. Чинков В. М. Основи метрології та вимірювальної техніки. – Х.: НТУ «ХПІ». – МОН України. – 2002. – 469с.

22. Тихонов В.И. Статистическая радиотехника. – М.: Радио и связь. – 1982. – 624 с.

23. Андреев Ф. М., Статкус А.В. Оценка ошибок измерения радиальных скорости и ускорения цели по данным моделирования // Вісник Харківського національного університету. – 2013. Серія «Математичне моделювання. Інформаційні технології. Автоматизовані системи управління», вип. 2. (в печати).

Надійшла до редколегії 10.11.2012

Рецензент: професор, д.т.н. Порошин С.М.

ОЦІНКА ТОЧНОСТІ ВИМІРЮВАННЯ РАДІАЛЬНИХ ШВИДКОСТІ ТА ПРИСКОРЕННЯ ЦІЛІ ЗА ДАННИМИ СИСТЕМИ КОГЕРЕНТНОЇ ОБРОБКИ РЛС

Ф.М. Андрєєв, А.В. Статкус

Запропоновано аналітичну модель для оцінки середньоквадратичних похибок радіальних швидкості та прискорення балістичних і космічних об'єктів за результатами когерентної обробки пачкового сигналу. За допомогою моделі має прийматися ґрунтовне рішення щодо включення системи когерентної обробки до складу РЛС.

Ключові слова: *радіолокаційна станція надгоризонтного виявлення, система когерентної обробки, похибки оцінок, радіальна швидкість, радіальне прискорення.*

EVALUATION OF MEASUREMENT ACCURACY IN DOPPLER AND RANGE ACCELERATION FOR RADAR COHERENT PROCESSING SYSTEM

F.M. Andreev, A.V. Statkus

The analytical model for estimates of mean squared error in Doppler and range acceleration of ballistic and space targets supplied with pulse train coherent processing are proposed. It should be used in the decision making on inclusion the pulse train coherent processing system into the radar.

Keywords: *early warning radar, coherent processing system, estimation errors, Doppler, range acceleration.*