

УДК 621.396.96

**ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ УСЛОВИЙ НАБЛЮДЕНИЯ
НА ТОЧНОСТЬ ИЗМЕРЕНИЯ ДИСКРЕТНЫХ ФИЛЬТРОВ КАЛМАНА
ПРИ НАБЛЮДЕНИИ ПРЯМОУГОЛЬНЫХ КООРДИНАТ МЕТОДОМ МОНТЕ-КАРЛО**

П.А. ХМАРСКИЙ, канд. техн. наук, доц. А.С. СОЛОНАР
(Военная академия Республики Беларусь, Минск)

Рассмотрены особенности метода линеаризации. Оценена точность аппроксимации гауссовской плотности вероятности при переходе из полярных координат в прямоугольные для различных условий наблюдения. Представлены результаты исследований по оценке влияния условий наблюдения на показатели качества различных модификаций дискретных фильтров Калмана при наблюдении прямоугольных координат.

Введение. В современных радиолокаторах сопровождение воздушных объектов, как правило, осуществляется в прямоугольных координатах при наблюдении полярных координат. Переход от прямоугольных координат к полярным и (или) обратно выполняется при помощи нелинейных функциональных преобразований. В этом случае использование напрямую уравнений дискретного линейного фильтра Калмана для сопровождения объектов невозможно. Известен целый ряд модификаций алгоритма его работы, позволяющих обойти эту проблему [1, 6, 10, 11, 15]. В основе этих модификаций лежит метод линеаризации, позволяющий заменить нелинейные преобразования на линейные в окрестности оценки (разовой или экстраполированной). Для этого нелинейные функции раскладываются в ряд Тейлора, из которого используется только первый член [1, 10, 11, 14].

При проведении радиолокационных наблюдений широкое распространение получили три модификации фильтра Калмана [12]: 1) при косвенном измерении; 2) при наблюдении коррелированных прямоугольных координат; 3) при наблюдении независимых прямоугольных координат. В первой модификации используется переход из прямоугольных координат в полярные, в остальных – переход из полярных в прямоугольные. Однако для некоторых условий наблюдений метод линеаризации не подходит. Так как его использование может привести к возникновению значительных ошибок сопровождения в модификациях фильтра Калмана [9, 13]. В известной литературе эти условия не конкретизированы.

Ввиду ограниченности объема в данной работе приводится лишь первая часть результатов исследований. Эта часть посвящена анализу влияния условий наблюдений на точность измерения дискретных фильтров Калмана при наблюдении коррелированных и независимых прямоугольных координат методом математического моделирования Монте-Карло.

Цель исследования – выявление условий наблюдений, которые будут оказывать существенное влияние на точность измерения дискретных фильтров Калмана при наблюдении прямоугольных координат методом Монте-Карло.

Постановка задачи

Начальные условия. Будем считать, что с выхода устройства обработки радиолокационной информации поступают разовые оценки полярных координат $\hat{\theta} = \left\| \begin{matrix} \hat{r} \\ \hat{\beta} \end{matrix} \right\|^T$ радиальной дальности r и азимута β от двухкоординатной радиолокационной станции (РЛС) кругового обзора. Над этими оценками осуществляется преобразование с целью перехода к разовым оценкам в прямоугольных координатах $\hat{\theta}_{xz} = \left\| \begin{matrix} \hat{x} \\ \hat{z} \end{matrix} \right\|^T$ (x соответствует направлению на север; z – на восток). Взаимосвязь между координатами осуществлялась при помощи нелинейной вектор-функции $\mathbf{h}(\bullet)$, которая при преобразовании из полярной системы координат (СК) в прямоугольную равнялась

$$\theta_{xz} = \left\| \begin{matrix} x \\ z \end{matrix} \right\| = \mathbf{h} \left(\left\| \begin{matrix} r \\ \beta \end{matrix} \right\| \right) = \left\| \begin{matrix} r \cos \beta \\ r \sin \beta \end{matrix} \right\|. \quad (1)$$

Ошибки наблюдения $\hat{\theta}$ некоррелированные и характеризуются корреляционной матрицей ошибок измерения [8]:

$$\mathbf{R}_{\theta} = \left\| \begin{matrix} \sigma_r^2 & 0 \\ 0 & \sigma_{\beta}^2 \end{matrix} \right\|,$$

где σ_r , σ_{β} – среднеквадратичное отклонение (СКО) гауссовских ошибок наблюдения радиальной дальности и азимута соответственно.

Интервал обновления данных считается постоянным и равен T . Наблюдается аэродинамический летательный аппарат, летящий с постоянной скоростью. В вектор состояния \mathbf{a} входят разовые оценки прямоугольных координат x, z и скоростей их изменения.

В рассматриваемых модификациях фильтров Калмана при наблюдении коррелированных и независимых прямоугольных координат фильтрация производится по $\hat{\boldsymbol{\theta}}_{xz}$.

Задачи

- 1) рассмотреть особенности метода линеаризации;
- 2) представить методику анализа влияния условий наблюдения на показатели качества двух модификаций фильтра Калмана;
- 3) методом математического моделирования оценить точность аппроксимации гауссовской плотности вероятности при переходе из полярных координат в прямоугольные координаты;
- 4) провести сопоставительный анализ результатов фильтрации модификаций фильтров Калмана.

Ошибки аппроксимации разовых оценок методом линеаризации. Метод линеаризации является одним из методов аппроксимации нелинейного преобразования в некоторой дельта-окрестности точки. Применительно к регулярным радиолокационным наблюдениям (когда оценка вектора наблюдения $\hat{\boldsymbol{\theta}}$ состоятельная, эффективная и несмещённая) метод линеаризации подразумевает разложение в ряд Тейлора нелинейного преобразования (1) в окрестности $\hat{\boldsymbol{\theta}}$ [5]:

$$\mathbf{h}(\boldsymbol{\theta}) = \mathbf{h}(\bar{\boldsymbol{\theta}} + \delta\boldsymbol{\theta}) = \mathbf{h}(\bar{\boldsymbol{\theta}}) + \nabla\mathbf{h}\delta\boldsymbol{\theta} + \frac{1}{2}\nabla^2\mathbf{h}\delta\boldsymbol{\theta}^2 + \frac{1}{3!}\nabla^3\mathbf{h}\delta\boldsymbol{\theta}^3 + \dots + \frac{1}{n!}\nabla^n\mathbf{h}\delta\boldsymbol{\theta}^n,$$

где $\bar{\boldsymbol{\theta}}$ – математическое ожидание (МО) $\boldsymbol{\theta}$; $\delta\boldsymbol{\theta}$ – дифференциал, который в данном случае может быть заменен случайной переменной, распределенной по нормальному закону распределения с нулевым МО; $\nabla\mathbf{h}$ – матрица частных производных Якоби; $\nabla^n\mathbf{h}\delta\boldsymbol{\theta}^n$ – соответствующий n -й член многомерного ряда Тейлора. Можно показать, что значение математического ожидания $\bar{\boldsymbol{\theta}}_{xz}$ и корреляционной матрицы (КМ) ошибок \mathbf{R}_{xz} в прямоугольной системе координат будут равны [5]:

$$\begin{aligned} \bar{\boldsymbol{\theta}}_{xz} &= E[\mathbf{h}(\bar{\boldsymbol{\theta}} + \delta\boldsymbol{\theta})] = \mathbf{h}(\bar{\boldsymbol{\theta}}) + E\left[\nabla\mathbf{h}\delta\boldsymbol{\theta} + \frac{1}{2!}\nabla^2\mathbf{h}\delta\boldsymbol{\theta}^2 + \frac{1}{3!}\nabla^3\mathbf{h}\delta\boldsymbol{\theta}^3 + \dots\right] = \mathbf{h}(\bar{\boldsymbol{\theta}}) + \frac{1}{2!}\nabla^2\mathbf{h}\delta\boldsymbol{\theta}^2 + \frac{1}{4!}\nabla^4\mathbf{h}\delta\boldsymbol{\theta}^4 + \dots \\ \mathbf{R}_{xz} &= E\left[(\boldsymbol{\theta}_{xz} - \bar{\boldsymbol{\theta}}_{xz})(\boldsymbol{\theta}_{xz} - \bar{\boldsymbol{\theta}}_{xz})^T\right], \end{aligned} \tag{2}$$

$$\text{где } \boldsymbol{\theta}_{xz} - \bar{\boldsymbol{\theta}}_{xz} = \mathbf{h}(\bar{\boldsymbol{\theta}} + \delta\boldsymbol{\theta}) - \bar{\boldsymbol{\theta}}_{xz} = \left(\nabla\mathbf{h}\delta\boldsymbol{\theta} + \frac{1}{2!}\nabla^2\mathbf{h}\delta\boldsymbol{\theta}^2 + \frac{1}{3!}\nabla^3\mathbf{h}\delta\boldsymbol{\theta}^3 + \dots\right) - E\left[\nabla\mathbf{h}\delta\boldsymbol{\theta} + \frac{1}{2!}\nabla^2\mathbf{h}\delta\boldsymbol{\theta}^2 + \frac{1}{3!}\nabla^3\mathbf{h}\delta\boldsymbol{\theta}^3 + \dots\right].$$

Отсюда получим

$$\begin{aligned} \mathbf{R}_{xz} &= E\left[\nabla\mathbf{h}\delta\boldsymbol{\theta}(\nabla\mathbf{h}\delta\boldsymbol{\theta})^T + \frac{\nabla\mathbf{h}\delta\boldsymbol{\theta}(\nabla\mathbf{h}^3\delta\boldsymbol{\theta})^T}{3!} + \frac{\nabla\mathbf{h}^2\delta\boldsymbol{\theta}(\nabla\mathbf{h}^2\delta\boldsymbol{\theta})^T}{2 \times 2!} + \frac{\nabla\mathbf{h}^3\delta\boldsymbol{\theta}(\nabla\mathbf{h}\delta\boldsymbol{\theta})^T}{3!}\right] - E\left[\frac{\nabla\mathbf{h}^2\delta\boldsymbol{\theta}}{2!}\right]\left[\frac{\nabla\mathbf{h}^2\delta\boldsymbol{\theta}}{2!}\right]^T + \dots = \\ &= \nabla\mathbf{h}\mathbf{R}_\theta(\nabla\mathbf{h})^T + E\left[\frac{\nabla\mathbf{h}\delta\boldsymbol{\theta}(\nabla\mathbf{h}^3\delta\boldsymbol{\theta})^T}{3!} + \frac{\nabla\mathbf{h}^2\delta\boldsymbol{\theta}(\nabla\mathbf{h}^2\delta\boldsymbol{\theta})^T}{2 \times 2!} + \frac{\nabla\mathbf{h}^3\delta\boldsymbol{\theta}(\nabla\mathbf{h}\delta\boldsymbol{\theta})^T}{3!}\right] - \left[\frac{(\nabla\mathbf{h})^T \mathbf{R}_\theta \nabla\mathbf{h}}{2!}\right]\left[\frac{(\nabla\mathbf{h})^T \mathbf{R}_\theta \nabla\mathbf{h}}{2!}\right]^T + \dots \end{aligned} \tag{3}$$

При использовании метода линеаризации для аппроксимации МО предполагается, что влиянием второго и более высоких порядков можно пренебречь; для аппроксимации КМ предполагается, что все нечетные члены ряда Тейлора будут равны нулю, а влиянием 4-го и более высоких порядков можно пренебречь. Тогда из выражений (2) и (3) получим требуемые значения МО и КМ [14]:

$$\bar{\boldsymbol{\theta}}_{xz} = \mathbf{h}(\bar{\boldsymbol{\theta}}), \quad \mathbf{R}_{xz} = \nabla\mathbf{h}\mathbf{R}_\theta(\nabla\mathbf{h})^T.$$

Показатели качества при оценке точности аппроксимации гауссовской плотности вероятности

В качестве выбранных показателей качества рассматривались: суммарная ошибка пересчета МО; ошибки пересчета МО методом линеаризации; ошибки пересчета элементов КМ экстраполяции методом линеаризации; состоятельность преобразования η (характеризует сходимость оценки к истинному значению [1]).

Устройство сопоставительного моделирования. При проведении исследований оценка точности аппроксимации гауссовской плотности вероятности (ПВ) осуществлялся методом математического мо-

делирования на ЭВМ. Для этого был разработан комплекс моделирования, позволяющий: устанавливать начальные значения; оценивать выбранные показатели качества для различных условий наблюдений; усреднять значения показателей качества; отображать результаты преобразований; сохранять в файл результаты проведенных модельных экспериментов; анализировать показатели качества по записанным смоделированным данным. При помощи интерфейса пользователь может выбрать требуемые начальные значения, а также используемые для сравнения методы преобразования ПВ. Сравнение производится по вычисленным показателям качества, значения которых усредняются по выбранному числу реализаций для каждого метода преобразования.

Оценка точности аппроксимации гауссовской плотности вероятности при переходе из полярных координат в прямоугольные

При переходе из полярных координат в прямоугольные оценку точности аппроксимации гауссовской ПВ можно разбить на два случая – с учетом взаимной корреляции прямоугольных координат и без учета взаимной корреляции прямоугольных координат.

Переход с учетом взаимной корреляции прямоугольных координат

Искаженная оценка МО и КМ преобразованной ПВ производится методом Монте-Карло, для чего генерируется 40000 случайных отсчетов в полярной СК, распределенных по гауссовскому закону с заданными МО и КМ. После генерации производится нелинейное преобразование (4) над каждым отсчетом. По полученной выборке Монте-Карло в прямоугольной СК оцениваются параметры преобразованной ПВ. Данный подход демонстрируется в верхней части рисунка 1, где наблюдается явное искажение исходной ПВ при переходе в прямоугольную СК.

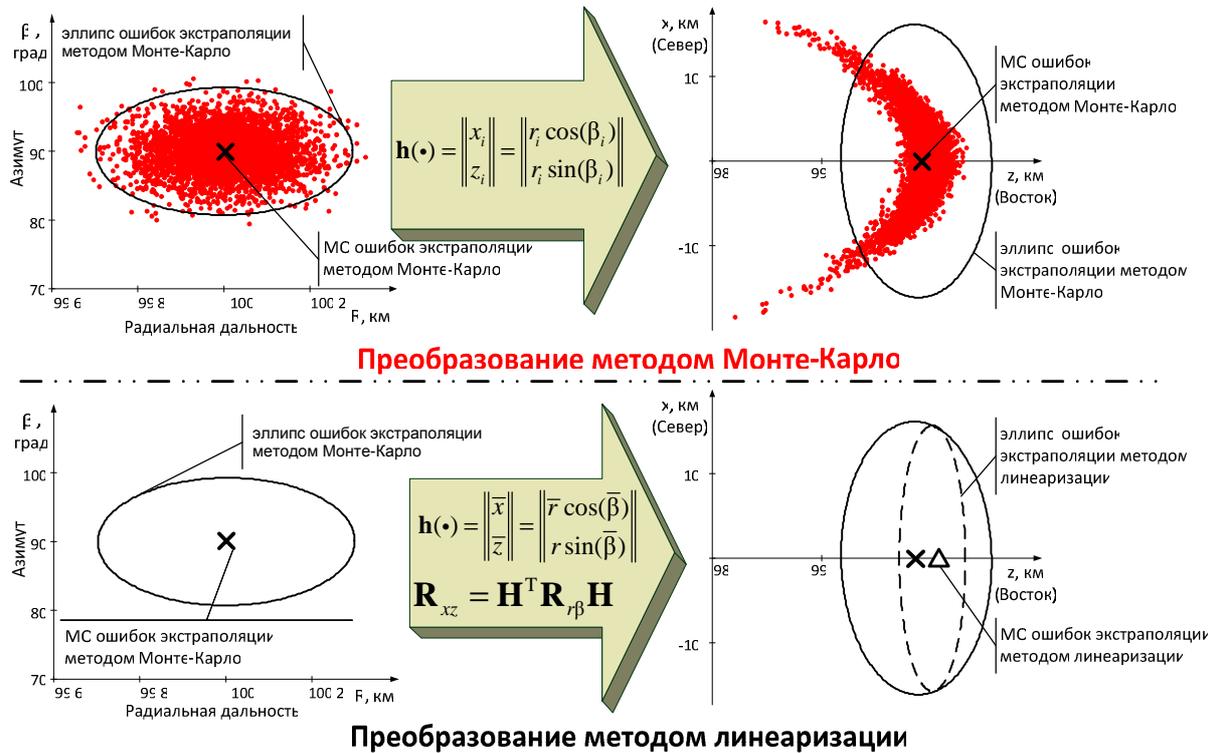


Рис. 1. Преобразование плотности вероятности при наблюдении и фильтрации прямоугольных координат методом Монте-Карло и методом линеаризации

Одновременно с методом Монте-Карло параметры преобразованной ПВ (МО $\mathbf{m}_{Lr\beta}$ и $\mathbf{R}_{Lr\beta}$) оценивались через метод линеаризации [15]:

$$\mathbf{m}_{Lr\beta} = \begin{bmatrix} \bar{x} \\ \bar{z} \end{bmatrix} = \mathbf{h}(\bar{\alpha}) = \mathbf{h} \left(\begin{bmatrix} \bar{r} \\ \bar{\beta} \end{bmatrix} \right) = \begin{bmatrix} \bar{r} \cos \bar{\beta} \\ \bar{r} \sin \bar{\beta} \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{R}_{Lr\beta} = \begin{bmatrix} \sigma_r^2 \cos^2 \bar{\beta} + r^2 \sigma_\beta^2 \sin^2 \bar{\beta} & (\sigma_r^2 - r^2 \sigma_\beta^2) \sin \bar{\beta} \cos \bar{\beta} \\ (\sigma_r^2 - r^2 \sigma_\beta^2) \sin \bar{\beta} \cos \bar{\beta} & \sigma_r^2 \sin^2 \bar{\beta} + r^2 \sigma_\beta^2 \cos^2 \bar{\beta} \end{bmatrix}.$$

В нижней части рисунка 1 продемонстрирована работа метода линеаризации. Здесь заметно явное отклонение оценки МО и значительное искажение эллипса ошибок экстраполяции (который описывается соответствующей КМ) от истинного значения.

Переход без учета взаимной корреляции прямоугольных координат

Вычисление значения МО не изменилось, отказ от учета взаимной корреляции приводит к тому, что элементы неглавной диагонали КМ считаются равными нулю [6; 11; 12]:

$$\mathbf{R}_{Lr\beta} = \begin{vmatrix} \sigma_r^2 \cos^2 \bar{\beta} + r^2 \sigma_\beta^2 \sin^2 \bar{\beta} & 0 \\ 0 & \sigma_r^2 \sin^2 \bar{\beta} + r^2 \sigma_\beta^2 \cos^2 \bar{\beta} \end{vmatrix}.$$

Выражения для определения показателей качества

Абсолютная ошибка пересчета МО:

$$\Sigma = \sqrt{(r_M \cos \beta_M - x_0)^2 + (r_M \sin \beta_M - z_0)^2}.$$

Ошибки пересчета МО по x Δx и по z Δz методом линеаризации:

$$\Delta x = |x_M - x_0|, \quad \Delta z = |z_M - z_0|,$$

где x_M, z_M – координаты МО, полученного методом Монте-Карло, в прямоугольной СК.

Ошибки пересчета элементов КМ экстраполяции методом линеаризации:

$$\Delta R_x = |R_{xM} - R_{xL}|, \quad \Delta R_z = |R_{zM} - R_{zL}|, \quad \Delta R_{xz} = |R_{xzM} - R_{xzL}|,$$

где R_{xM}, R_{zM}, R_{xzM} – элементы КМ, полученной методом Монте-Карло, в полярной СК по радиальной дальности, азимуту и взаимной корреляции радиальной дальности и азимута; R_{xL}, R_{zL}, R_{xzL} – элементы КМ, полученной методом линеаризации, в полярной СК по радиальной дальности, азимуту и взаимной корреляции радиальной дальности и азимута;

Состоятельность преобразования [1]:

$$\eta = \text{tr} \left((\mathbf{m}_{0xz} - \mathbf{m}_{Mxz}) (\mathbf{m}_{0xz} - \mathbf{m}_{Mxz})^T + \mathbf{R}_{0xz} \right) \mathbf{R}_{Mxz}^{-1},$$

где \mathbf{m}_{0xz} – МО в прямоугольной СК, полученное методом линеаризации; \mathbf{m}_{Mxz} – МО в прямоугольной СК, полученное методом Монте-Карло; \mathbf{R}_{0xz} – КМ, полученная методом линеаризации; \mathbf{R}_{Mxz} – КМ, полученная методом Монте-Карло.

Условия проведения модельных экспериментов для оценки точности аппроксимации гауссовской ПВ представлены в таблице 1.

Таблица 1

Условия проведения модельных экспериментов

Название эксперимента	r_H , км	β_H , град	σ_r , м	σ_β , мин
1. Влияние изменения азимута	100; 10	0–360	100	120; 60; 15
2. Влияние изменения радиальной дальности	10–200	90	100	120
3. Влияние СКО ошибки измерения азимута	100	90	100; 500	10–180

Результаты проведенных исследований позволили сделать следующие выводы о влиянии условий наблюдения на результаты аппроксимации гауссовской ПВ при переходе из полярной СК в прямоугольную:

- наиболее сильное влияние на изменение ошибок аппроксимации и состоятельность оценки оказывают СКО ошибки измерения азимута, радиальная дальность до летательного аппарата и его азимут;
- среднеквадратичное отклонение ошибки измерения радиальной дальности оказывает незначительное влияние на ошибки аппроксимации методом линеаризации;
- учет взаимной корреляции прямоугольных координат оказывает влияние только на ошибку аппроксимации элемента КМ ошибок по xz .

Влияние ошибок аппроксимации ПВ наблюдения на качество фильтрации для различных условий наблюдения

Методика исследования влияния условий наблюдения на показатели качества фильтрации модификаций дискретных фильтров Калмана включала в себя следующие этапы: определение показателей качества; разработка комплекса математического моделирования для анализа выбранных показателей качества; определение условий моделирования; математическое моделирование и сопоставительный анализ.

Устройство сопоставительного моделирования и условия моделирования

Выбор показателей качества. В качестве показателя качества фильтрации модификаций дискретных фильтров Калмана было выбрано СКО суммарной ошибки измерения местоположения $\Delta_{\Sigma}(k)$ [15]. Значение $\Delta_{\Sigma}(k)$ нормировалось к СКО текущих оценок. В ходе моделирования каждого модельного эксперимента результаты усреднялись по 5000 опытных реализаций.

Для сопоставительного моделирования качества фильтрации модификаций фильтров Калмана использовался комплекс математического моделирования [12, 13]. Скорость летательного аппарата была постоянной и равнялась 1000 км/ч. Условия проведения модельных экспериментов по сопоставлению показателей качества различных фильтров Калмана представлены в таблице 2.

Таблица 2

Условия проведения модельных экспериментов
по сопоставлению результатов работы модификаций фильтров Калмана

Название эксперимента	r_H , км	β_H , град	σ_r , м	σ_{β} , мин	α , град
1. Влияние изменения курса летательного аппарата	100	90	100	25; 70	0–360
2. Влияние изменения СКО ошибок измерения азимута	100	90	100	10–180	45
3. Влияние изменения начальной радиальной дальности до летательного аппарата	10–200	90	100	25; 40; 70	45

Траектории при проведении модельных экспериментов изображены на рисунках 3, а, б, в. При исследовании влияния изменения курса летательного аппарата, СКО ошибок измерения азимута, траектории выбирались таким образом, чтобы на 40-м шаге обновления данных летательный аппарат пролетал на дальности 100 км от РЛС с азимутом 90°. Такой выбор гарантирует завершение всех переходных процессов, происходящих в модификациях фильтров Калмана.

Результаты сопоставления модификаций фильтров Калмана для различных условий наблюдения

Влияние изменения курса летательного аппарата. Траектории летательного аппарата, скорость которого составляла 720 км/ч, изображены на рисунке 2, а.

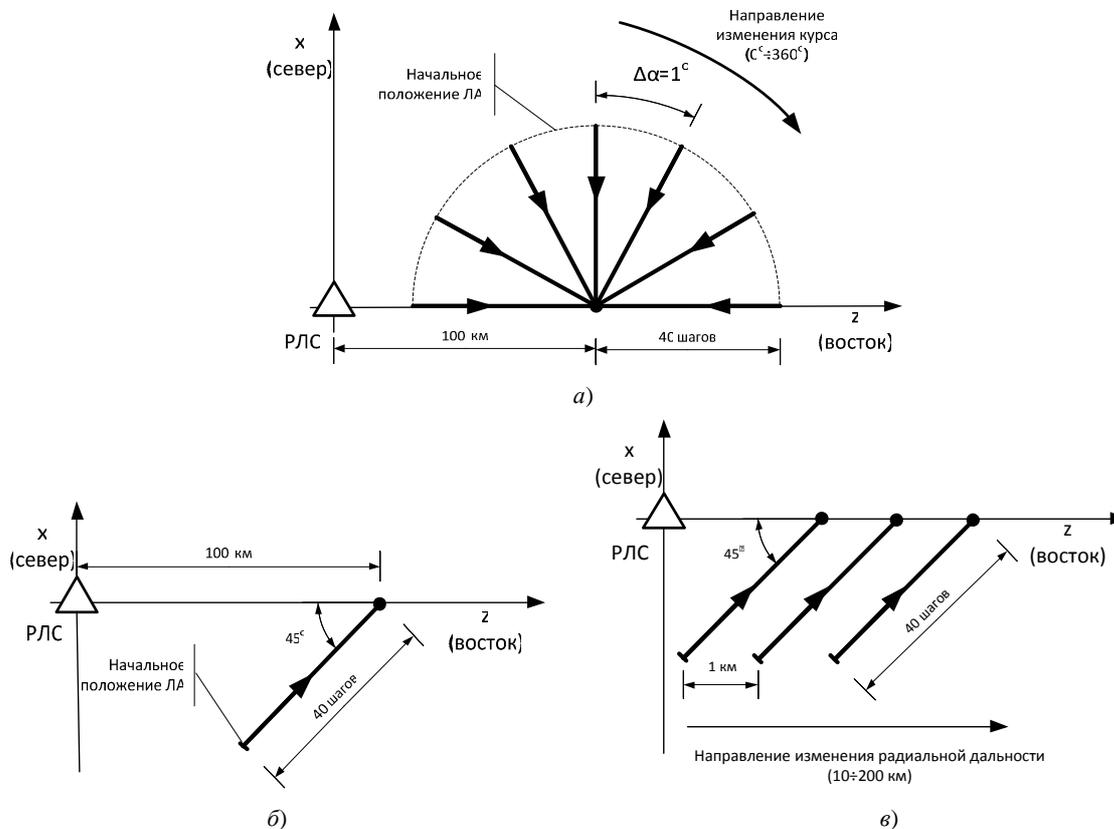


Рис. 2. Условия проведения модельных экспериментов:
а – влияние изменения угла курса; б – влияние изменения СКО ошибки измерения азимута;
в – влияние изменения начальной радиальной дальности

На рисунках 3 а, б представлены значения суммарной ошибки измерения местоположения для различных значений σ_β . Учет взаимной корреляции приводит к выигрышу до 12 %, что подтверждают проведенные исследования в работе [12]. Для меньшего значения σ_β максимальное значение ошибки наблюдается для значений курса равных 90 и 270°. Это поясняется максимальным значением ошибки аппроксимации МО.

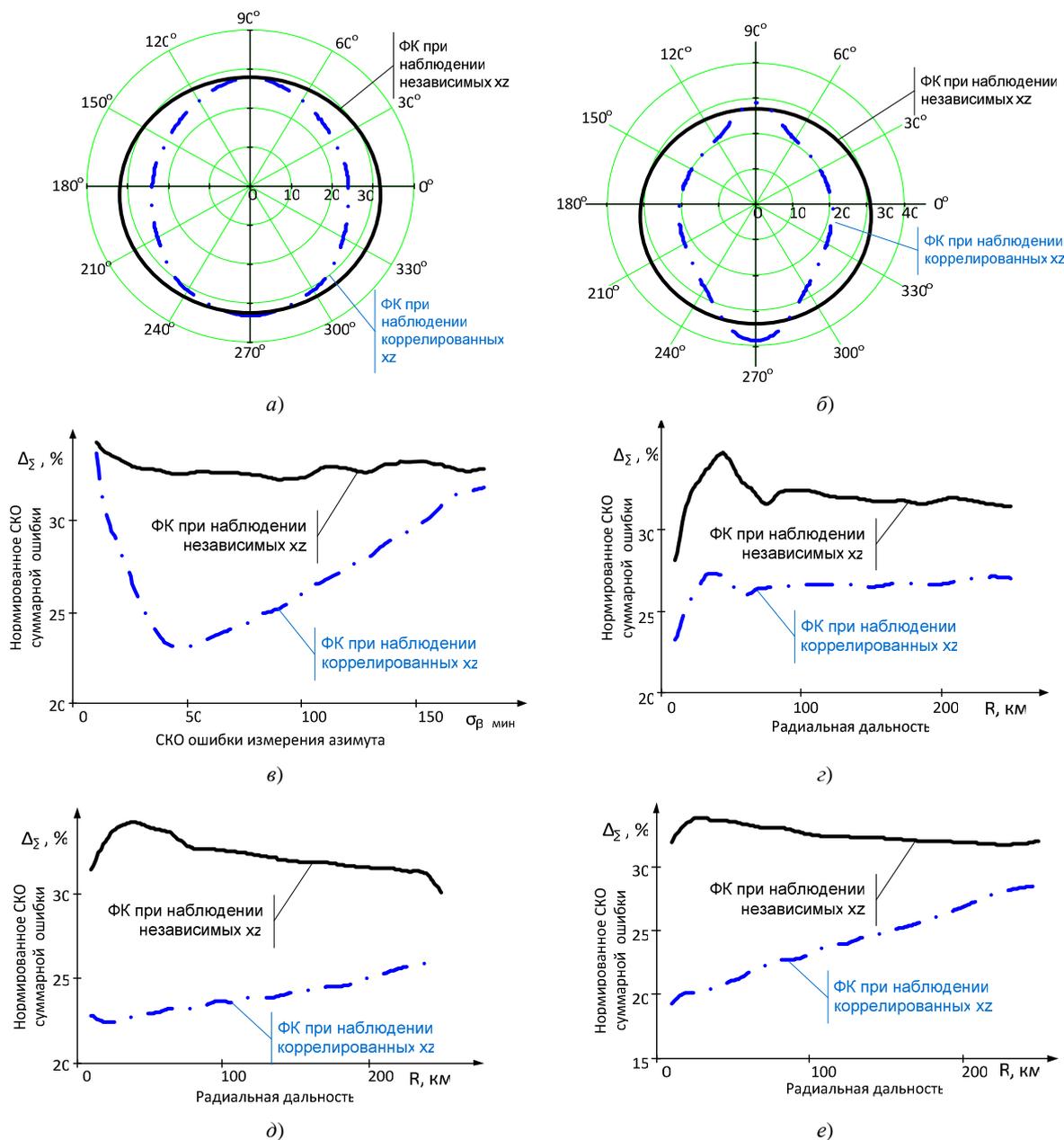


Рис. 3. Значение нормированной суммарной ошибки измерения местоположения при изменении угла курса (а, б, в), радиальной дальности (г, д, е):

а – $\sigma_\beta = 25'$; б – $\sigma_\beta = 70'$; в – при изменении СКО ошибки измерения азимута; г – $\sigma_\beta = 25'$; д – $\sigma_\beta = 40'$; е – $\sigma_\beta = 70'$

Влияние изменения среднеквадратичного отклонения ошибок измерения азимута. Траектория для проведения данного модельного эксперимента изображена на рисунке 2, б. Результаты моделирования представлены на рисунке 3, в. Как и в предыдущем модельном эксперименте, условия проведения выбраны таким образом, чтобы летательный аппарат пролетал на 40-м шаге наблюдения радиальную дальность 100 км от РЛС и азимут 90°. Учет взаимной корреляции для таких условий наблюдения приводит к выигрышу до 15 %.

Влияние изменения начальной радиальной дальности до летательного аппарата. Траектории для проведения данного модельного эксперимента изображены на рисунке 2, в. Результаты представлены на

рисунках 3, z, δ , e для различных значений σ_{β} – 25', 40' и 70'. Фильтр Калмана при наблюдении независимых прямоугольных координат проигрывает лучшим показателям до 15 %.

Заключение. Для некоторых условий радиолокационных наблюдений метод линеаризации не подходит по причине возникновения значительных ошибок аппроксимации. Изменение ошибок аппроксимации напрямую влияют на результаты работы алгоритмов фильтрации. Наиболее сильное влияние на изменение ошибок аппроксимации и состоятельность оценки оказывают: среднеквадратичное отклонение ошибки измерения азимута, радиальная дальность до летательного аппарата, его азимут. Среднеквадратичное отклонение ошибки измерения радиальной дальности оказывает несущественное влияние на ошибки аппроксимации методом линеаризации. Учет взаимной корреляции прямоугольных координат оказывает влияние только на ошибку аппроксимации элемента корреляционной матрицы ошибок по xz и приводит к выигрышу по точности до 15 %.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бар-Шалом, Я. Траекторная обработка. Принципы, способы и алгоритмы / Я. Бар-Шалом, Х.-Р. Ли. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011.
2. Горшков, С.А. Использование численного метода интегрирования Монте-Карло для аппроксимации плотности вероятности / С.А. Горшков, А.В. Парахневич, А.С. Солонар // Докл. БГУИР. – 2012. – № 1. – С 22–29.
3. Жданюк, Б.Ф. Основы статистической обработки траекторных измерений / Б.Ф. Жданюк. – М.: Сов. радио, 1978. – 384 с.
4. Канашенков, А.И. Защита РЛС от помех. Состояние и тенденции развития / А.И. Канашенков, В.И. Меркулов. – М.: Радиотехника, 2003. – 415 с.
5. Корон, Г. Справочник по математике для научных работников и инженеров / Г. Корон, Т. Корон. – М.: Наука. – 1984. – 521 с.
6. Кузьмин, С.З. Цифровая радиолокация. Введение в теорию / С.З. Кузьмин. – Киев: Изд-во КвиЦ, 2000. – 428 с.
7. Меркулов, В.И. Авиационные системы управления / В.И. Меркулов, А.И. Канашенков. – М.: Радио и связь. – 1997. – Ч. 3. – 320 с.
8. Охрименко, А.Е. Основы обработки и передачи информации / А.Е. Охрименко. – Минск: МВИЗРУ ПВО, 1990. – 179 с.
9. Просов, А.В. Анализ влияния линеаризации результатов радиолокационных измерений на точность оценок вектора состояния цели / А.В. Просов // Системы обработки информации. – Харьков, 2008. – № 2(69). – С. 95–97.
10. Тихонов, В.И. Статистическая радиотехника / В.И. Тихонов. – М.: Радио и связь, 1982. – 624 с.
11. Фарина, А. Цифровая обработка радиолокационной информации. Сопровождение целей / А. Фарина, Ф. Студер; пер. с англ. – М.: Радио и связь, 1993.
12. Хмарский, П.А. Влияние выбора моделей входного воздействия на точность измерений вектора состояния для фильтров Калмана / П.А. Хмарский, А.С. Солонар // Докл. БГУИР. – 2012. – № 7. – С. 47–53.
13. Хмарский, П.А. Особенности работы алгоритма ансамблевого фильтра Калмана при наблюдении объектов в полярных координатах / П.А. Хмарский, А.С. Солонар // Докл. БГУИР. – 2013. – № 2. – С. 79–86.
14. Худсон, Д. Статистика для физиков. Лекции по теории вероятности и элементарной статистике / Д. Худсон; пер. с англ. – М.: Мир. – 1970. – 296 с.
15. Ширман, Я.Д. Радиоэлектронные системы: Основы построения и теория. Справочник / Я.Д. Ширман. – 2-е изд. перераб. и доп. – М.: Радиотехника, 2007.

Поступила 09.01.2014

CONDITIONS OF OBSERVATION RESEARCH FOR CONVERTED MEASUREMENT KALMAN FILTER GOODNESS-OF-FIT USING MONTE-CARLO METHOD

P. KHMARSKI, A. SOLONAR

Singularities of linearization technique are considered. Accuracy of approximation Gaussian probability density at conversion of measurements from polar coordinates to Cartesian for various conditions of observation is estimated using Monte-Carlo method. Conditions of observation research for converted measurement Kalman filter goodness-of-fit are presented.