

УДК 629.7.76.78:621.396.317:519.24

Оптимальный метод совместной обработки траекторных данных измерителей наземного и космического базирования для летных испытаний элементов авиационных космических ракетных комплексов

Н. Д. Огороднийчук

Київський інститут Військово-повітряних Сил

Надійшла до редакції 15.09.98

Розроблені оптимальний метод і алгоритм для сумісної обробки структурно-надмірних траекторних даних вимірювачів наземного і космічного базування. Метод відзначається гранично високою точністю.

ВВЕДЕНИЕ

Точность измерения дальностей с помощью сетевых спутниковых радионавигационных систем (СРНС) стала соизмеримой с точностью наземных станций радиолокационного контроля траекторий. В связи с этим естественно возникла задача совместной обработки данных измерителей наземного и космического базирования. Особенно актуально решение этой задачи в интересах летных испытаний элементов авиационных космических ракетных комплексов [3].

Данные измерений, как правило, обладают структурной и временной избыточностью. Ее используют для повышения точности оценки параметров объекта испытаний. С целью сокращения сроков обработки реализацию этих двух видов избыточности осуществляют последовательно. О реализации временной избыточности см., например, [5]. Здесь рассматривается этап реализации струк-

турной избыточности применительно к совместной обработке данных измерителей наземного и космического базирования.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В результате совместной работы измерителей наземного и (или) космического базирования получен m -мерный вектор $\xi'^T = \|\xi'_1 \dots \xi'_j \dots \xi'_m\|$ ($m \geq 3, \dots, 5$) первичных координат любого типа (дальности, псевдодальности, азимуты, углы места, направляющие косинусы). Эту информацию необходимо обработать наилучшим образом для возможно более точной оценки вектора \mathbf{r} вторичных параметров положения объекта на траектории произвольной формы.

Для решения задачи сделаны следующие вполне реальные допущения: местоположение измерителей в данный момент времени известно или может быть

определено; данные со всех измерителей снимаются одновременно или приводятся к единым моментам времени в процессе реализации временной избыточности; влияние систематических погрешностей исключено введением поправок; случайные погрешности измерителей распределены не обязательно по нормальному закону; их дисперсии $\sigma_{\xi_j}^2$ ($j = 1, \dots, m$) или взаимная корреляционная матрица K_{ξ} — известны.

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ

Оптимальная статистическая оценка местоположения объекта находится обобщенным методом как решение нелинейного уравнения правдоподобия. Она достигается через ряд последовательных приближений по рекуррентной формуле (1)

$$\hat{r}_{\nu+1} = \hat{r}_{\nu} + \Delta \hat{r}_{\nu} = \hat{r}_{\nu} + (F_{\nu}^T \Lambda F_{\nu})^{-1} F_{\nu}^T \Lambda [\xi - \xi(\hat{r}_{\nu})], \quad (1)$$

где ν — номер приближения; t — символ транспонирования; ξ — вектор измерений после ввода поправок; $\xi(\hat{r}_{\nu})$ — вектор вычисленных значений первичных координат на этапе ν -го приближения; $\Lambda = K_{\xi}^{-1}$ — весовая матрица, обратная взаимной корреляционной матрице погрешностей измерений, оставшихся после ввода поправок; F_{ν} — матрица градиентов поля измеряемых (преобразованных первичных) координат на этапе ν -го приближения.

Начальное приближение \hat{r}_0 в первой точке траектории выбирается произвольно или рассчитывается по минимуму данных одним из простых методов; в последующих точках — в качестве \hat{r}_0 может быть использована оценка, найденная для предыдущей точки траектории.

Геометрическая интерпретация перехода от ν -го до $\nu + 1$ -го приближения к статистической оценке дана на рис. 1, выполненном для наглядности применительно к измерениям тремя равноточными дальномерами в двумерном пространстве. Видно, что $\nu + 1$ -е приближение является результатом сложения ν -го приближения статистической оценки и поправки $\Delta \hat{r}_{\nu}$, полученной в результате линейного преобразования (с помощью матриц Λ и F_{ν}) суммы взвешенных векторных отклонений b_{jp} линий положения от ν -го приближения.

Итерационный процесс завершается при выполнении неравенства

$$|\Delta \hat{r}_{\nu}| = |\hat{r}_{\nu+1} - \hat{r}_{\nu}| < \varepsilon. \quad (2)$$

При $\varepsilon = 0.05$ — 0.5 м это происходит после выполнения 2–4 итераций.

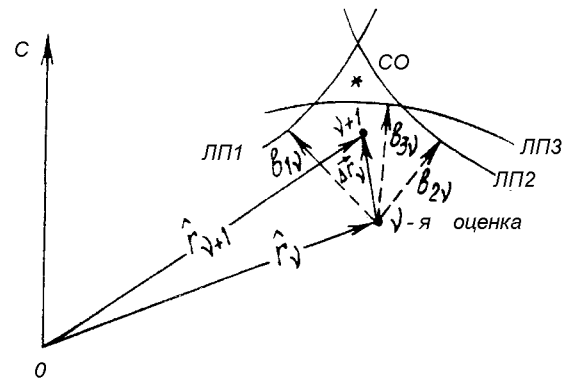


Рис. 1. Геометрическая интерпретация процесса последовательных приближений к статистической оценке местоположения объекта испытаний

Статистическая оценка, к которой сходятся последовательные приближения, расположена в точке пространства, относительно которой сумма взвешенных векторных отклонений поверхностей положения или линий положения равна нулю (см. рис. 1 и формулу (4)). При обработке минимума данных такой точкой является точка пересечения трех поверхностей (или двух линий — в двумерном пространстве), т. е. в этом случае обобщенный и соответствующий простой методы равноточны.

При нормальном законе распределения погрешностей измерений статистическая оценка обладает свойствами максимально-правдоподобной оценки, т. е. является состоятельной, несмещенной и асимптотически эффективной; при других законах распределения погрешностей — свойствами минимально-квадратичной оценки, т. е. является состоятельной и несмещенной.

Дисперсия погрешностей местоопределения объекта испытаний

$$\sigma_{\hat{r}}^2 = \text{Sp}(F^T \Lambda F)^{-1}, \quad (3)$$

где Sp — символ следа матрицы.

Более простой вариант обобщенного метода, представленный формулами

$$\hat{r}_{\nu+1} = \hat{r}_{\nu} + \Delta \hat{r}_{\nu} = \hat{r}_{\nu} + \left(\sum_{j=1}^m \mathbf{f}_j \mathbf{f}_j^T / \sigma_{\xi_j}^2 \right)^{-1} \sum_{j=1}^m \mathbf{f}_j [\xi_j - \xi_j(\hat{r}_{\nu})] / \sigma_{\xi_j}^2 = \hat{r}_{\nu} + \left(\sum_{j=1}^m \mathbf{f}_j \mathbf{f}_j^T / \sigma_{\xi_j}^2 \right)^{-1} \sum_{j=1}^m (\mathbf{b}_{jp} / \sigma_{\xi_j}^2), \quad (4)$$

$$\sigma_{\hat{r}}^2 = \text{Sp} \left(\sum_{j=1}^m \mathbf{f}_j \mathbf{f}_j^T / \sigma_{\xi_j}^2 \right)^{-1}, \quad (5)$$

(где \mathbf{f}_{jp} — градиент поля j -й первичной координаты в точке ν -го приближения, \mathbf{b}_{jp} — векторное откло-

нение j -й поверхности положения относительно ν -го приближения, σ_{ν}^2 — дисперсия погрешностей в определении j -й поверхности в окрестности ν -го приближения), разработан применительно к взаимно некоррелированным погрешностям измерений и параллельному ориентированию одноименных осей всех угломеров [4]. Этот вариант метода десятки лет используется для совместной оптимальной обработки данных измерителей наземного базирования на трассах небольшой протяженности. Накоплен большой опыт работы с ним, подтвердивший высокую сходимость итеративного процесса, возможность повышения точности местоопределения в 1.5—3 раза при обработке структурно избыточных данных и небольшие затраты машинного времени: 0.007 с в пересчете на один первичный параметр в одной точке траектории на ЭВМ с производительностью 1 млн оп./с. Этот опыт может оказаться весьма полезным при совместной обработке данных измерителей наземного и космического базирования.

Трудности, которые возникают при совместной обработке по формулам (1)—(3) данных измерителей наземного и космического базирования на трассах большой протяженности, обусловлены различной ориентацией осей угломеров наземного базирования и непрерывным движением измерителей космического базирования. Это приводит, в частности, к необходимости использования трех видов правых прямоугольных пространственных систем координат (рис. 2): гринвичской геоцентрической (в даль-

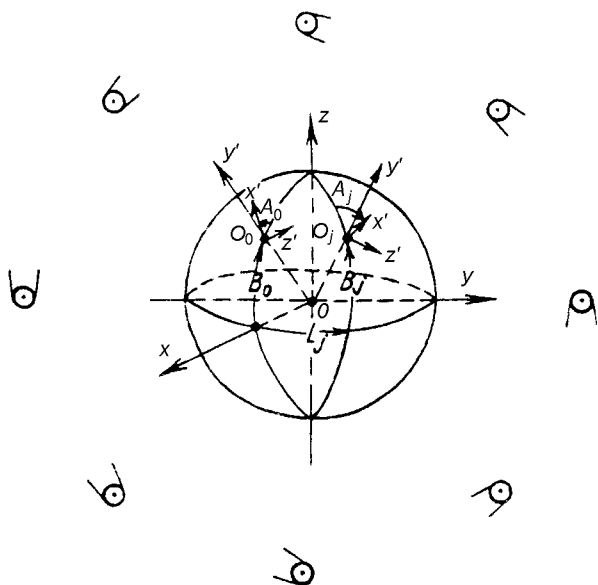


Рис. 2. Взаимное положение гринвичской, стартовой, измерительной систем координат и одномоментное положение НИСЗ на одной из трех орбит СС РНС ГЛОНАСС

нейшем — геосистемы) и двух топоцентрических — стартовой и измерительной (в дальнейшем — топо-систем).

В измерительных топосистемах выполняются измерения первичных ξ' -параметров, расчеты начального приближения и данных целеуказания; в стартовой — наглядно представляются конечные результаты. В геосистеме удобно осуществлять совместную обработку данных. Но для этого необходимо преобразовать в нее координаты измерителей, данные измерений и другие элементы, явно или неявно входящие в формулы (1)—(3).

Для определения гринвичских геоцентрических координат (в дальнейшем — геокоординат) наземных измерителей и начала стартовой системы необходимо:

- преобразовать их астрономические координаты и азимуты относительно геоида в геодезические координаты и азимуты относительно референц-эллипсоида. Это позволит избежать погрешностей до 300 м [1];
- преобразовать геодезические координаты и азимуты относительно референц-эллипсоида в геодезические координаты и азимуты относительно общего земного эллипсоида;
- вычислить по ним геокоординаты начала стартовой системы и наземных измерителей, а также матрицы C_i направляющих косинусов осей всех топосистем относительно осей геосистемы, необходимые для прямого и обратного преобразования координат объекта [2]. Высокая точность привязки наземных измерителей обеспечивается опорой на триангуляционную сеть первого класса. При ее отсутствии можно использовать для этих целей, хоть и с меньшей точностью, астрономические методы или данные СС РНС.

Измерителем космического базирования является навигационный искусственный спутник Земли (НИСЗ). Для расчета на данный момент времени его геокоординат аппаратуре потребителя, которая должна быть установлена на объекте испытаний, сообщаются через НИСЗ эфемериды для прогноза местоположения НИСЗ с погрешностью в несколько метров в интервале ± 30 мин относительно момента времени, на который рассчитаны эфемериды [6]. Поскольку НИСЗ находится в движении, то вычисления по эфемеридам придется повторять для каждого дискретного момента времени с поправкой на время распространения радиоволн от НИСЗ до объекта. Высокая точность местоопределения НИСЗ обеспечивается огромным объемом статистических данных, по которым вычисляются эфемериды. Для повышения точности временной привязки измерений следовало бы перейти к использованию

на борту объекта испытаний рубидиевых стандартов частоты. По массогабаритным показателям и потребляемой мощности они мало отличаются от кварцевых, но на 2—3 порядка превосходят их по стабильности частоты. Погрешности временной привязки учитываются в оценке точности измерений дальности по данным НИСЗ.

Далее измеренные по радиосигналам НИСЗ псевдодальности с помощью квазидальномерного метода необходимо преобразовать в дальности [6]. В угловые координаты, полученные от наземных измерителей, необходимо ввести поправки на непараллельность осей топосистем к одноименным осям геосистемы. Для этого каждую пару угловых координат (азимут и угол места; пара направляющих косинусов) нужно дополнить фиктивной дальностью $R' = 1$ м с нулевой дисперсией и выполнить:

- преобразование каждой пары угловых координат и фиктивной дальности в прямоугольные топоцентрические координаты (в дальнейшем — топокоординаты);
- преобразование с помощью матрицы C_i топокоординат в геокоординаты;
- преобразование геокоординат в первичные ξ -координаты, как бы измеренные относительно осей (плоскостей) новой топосистемы, параллельных одноименным осям (плоскостям) геосистемы.

Из каждой тройки преобразованных таким образом первичных координат в состав общего вектора подлежащих совместной обработке ξ -измерений включаются только пары угловых координат объекта, а также все дальности от объекта до измерителей, не подвергавшиеся преобразованиям в связи с инвариантностью к системам координат.

Для определения корреляционной матрицы погрешностей каждой тройки преобразованных таким образом первичных координат необходимо найти произведение матриц третьего порядка:

$$K_{i\xi} = J_i C_i G_i K_{i\xi'} G_i^T C_i^T J_i^T, \quad (6)$$

где $K_{i\xi'}$ — взаимная корреляционная матрица погрешностей i -й тройки данных ξ' -измерений; G_i — матрица преобразования погрешностей данных ξ' -измерений в погрешности топокоординат; J_i — матрица преобразования погрешностей геокоординат в погрешности преобразованных первичных ξ -координат. Из каждой матрицы (6) в состав общей взаимной корреляционной матрицы K_ξ включаются по 4 элемента, соответствующие принятым в обработку парам угловых координат, а также дисперсии погрешностей измерений дальностей. Они располагаются на главной диагонали матрицы K_ξ в виде матричных клеток второго и перво-

го порядка соответственно. Остальные недиагональные элементы этой матрицы равны нулю. Это значительно облегчает обращение такой матрицы в весовую матрицу $\Lambda = K_\xi^{-1}$, несмотря на высокий ее порядок.

И наконец, формулы элементов матрицы F градиентов поля преобразованных ξ -координат, необходимые для вычислений по формулам (1), (3), находятся путем дифференцирования в частных производных канонических уравнений соответствующих поверхностей положения (сферы, плоскости, конуса) по геокоординатам.

На заключительном этапе, используя матрицу направляющих косинусов C_0^T , осуществляют преобразование координат статистической оценки местоположения объекта из геосистемы в стартовую систему и определяют дисперсию погрешностей местоопределения объекта в стартовой системе:

$$\sigma_{\hat{p}}^2 = \text{Sp}[C_0(F^T \Lambda F)^{-1} C_0^T]. \quad (7)$$

Анализ точности статистической оценки местоположения показал, что она зависит от количества, типов и точности измерений первичных параметров, а также от взаимного положения объекта испытаний и измерителей наземного и (или) космического базирования. Точность местоопределения является наивысшей в области пространства с наибольшим числом троек поверхностей положения, близких к ортогональным.

У каждого простого метода есть зоны высокой и низкой точности, как правило, не совпадающие для различных методов. Обобщенный метод объединяет зоны высокой точности различных простых методов и значительно расширяет их благодаря реализации структурной избыточности.

При совместной обработке данных измерителей наземного и космического базирования зоны точности местоопределения становятся подвижными, изменяющимися не только в пространстве, но и во времени. Вместе с ними изменяется и представление о существенности информации того или иного измерителя.

Формулы оценки точности (3), (5) или (7) могут быть также применены для обоснования выбора, размещения и эффективного использования измерителей в системах контроля траекторий, для оценки влияния геометрического фактора, для прогноза и контроля точности измерительных комплексов, а также при их проектировании.

Можно показать, что дисперсия погрешностей местоопределения σ_r^2 равна сумме квадратов полуосей единичного эллипсоида погрешностей, и вероятность $P(\sigma_r) = 65 \pm 3.5 \%$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

СС РНС NAVSTAR и ГЛОНАСС, вместе взятые, способны обеспечить наблюдение до 15—18 НИСЗ одновременно неограниченным количеством потребителей [3, 6]. Использование данных этих НИСЗ при летных испытаниях совместно с данными измерителей наземного базирования позволит в несколько раз повысить степень структурной избыточности траекторной информации. А ее совместная оптимальная обработка предлагаемым методом существенно повысит точность местоопределения и характеристик объектов испытаний на трассах любой протяженности. Этот метод применим при летных испытаниях не только элементов авиационных космических ракетных комплексов, но также при запусках ракет с плавучих космодромов, при испытаниях других объектов ракетной, морской, авиационной и космической техники.

На трассах небольшой (десятки километров) протяженности совместную оптимальную обработку данных измерителей наземного и космического базирования проще выполнять в стартовой системе координат на основе варианта обобщенного метода, представленного формулами (4), (5).

Для обеспечения возможности совместной обработки данных измерителей наземного и космического базирования необходимо доработать аппаратуру потребителя информации СС РНС в соответ-

ствии с требованиями испытательной практики и оборудовать ею объекты испытаний.

1. Закатов П. С. Курс высшей геодезии. — М.: Изд-во геод. и картограф. лит-ры, 1953.—405 с.
2. Космические траекторные измерения / Под ред. П. А. Агаджанова, В. Е. Дулевича, А. А. Коростелева. — М.: Сов. радио, 1969.—498 с.
3. Куликов С. П. Об использовании радионавигационных систем наблюдения космического базирования при летных испытаниях элементов авиационных космических ракетных комплексов // Космічна наука і технологія.—1997.—3, № 3-4.—С. 96—100.
4. Огороднийчук Н. Д. Статистическая оценка положения объекта по избыточной первичной информации. — Л.: ЛВИКА им. А. Ф. Можайского, 1966.—43 с.
5. Огороднийчук Н. Д. Обработка траекторной информации. Часть 2. Адаптивное оптимальное сглаживание. — Киев: КВВАИУ, 1986.—224 с.
6. Шебшаевич В. С., Дмитриев П. П., Иванцевич Н. В. и др. Сетевые спутниковые радионавигационные системы. — М.: Радио и связь, 1993.—408 с.

**OPTIMAL METHOD FOR JOINT PROCESSING
OF THE TRAJECTORY DATA OBTAINED
FROM GROUND-BASED AND SPACE-BORNE METERS
FOR FLIGHT TESTS OF ELEMENTS OF AEROSPACE
ROCKET COMPLEXES**

N. D. Ogorodniichuk

An optimal method and an algorithm were worked out for the joint processing of the trajectory data obtained from ground-based and space-borne meters when the data are structurally redundant. The method is characterized by extremely high precision.