

АНАЛИЗ АЛГОРИТМОВ ОБРАБОТКИ РЕТРАНСЛИРОВАННЫХ СИГНАЛОВ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КООРДИНАТ АВАРИЙНО-СПАСАТЕЛЬНЫХ ФОРМИРОВАНИЙ МЧС РОССИИ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ ОПЕРАЦИЙ В ЗОНАХ ОСОБОГО РИСКА

С.Н. Терехин, кандидат технических наук, доцент;

А.Г. Филиппов.

Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России

Проведен анализ алгоритмов обработки ретранслированных сигналов для систем позиционирования подразделений МЧС России. В качестве основных позиционных методов определения координат рассмотрены навигационные системы второго поколения. Определена нецелесообразность использования более простого дальномерного метода навигационных определений из-за отсутствия в большинстве моделей навигационных систем компактных и дешевых высокостабильных эталонов времени (частоты).

Ключевые слова: сверхширокополосный сигнал, псевдоспутник, навигационная задача, псевдодальность

ANALYSIS OF ALGORITHMS OF TREATMENT OF THE RETRANSMITTED SIGNALS FOR DETERMINATION OF COORDINATES OF RESCUE UNITS OF EMERCOM OF RUSSIA DURING REALIZATION OF OPERATIONS IN ZONES OF THE SPECIAL RISK

S.N. Terehin; A.G. Filippov.

Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia

The analysis of algorithms of treatment of the retransmitted signals is conducted for the systems of positioning of subdivisions of EMERCOM of Russia. As basic position methods of determination of coordinates the navigational of the second generation are considered. Pointlessness of the use of more simple range-finder method of navigation determinations is certain because of absence in most models of navigational compact and cheap high-stable standards of time(frequencies).

Key words: the navigation field, pseudocompanion, high-elliptic orbits, surface apparatus of navigation signals

Основным содержанием навигационной задачи (НЗ) в глобальных навигационных спутниковых системах (ГНСС) является определение вектора состояния потребителя. В качестве компонент этого вектора обычно рассматривают пространственные координаты x, y, z потребителя, временная поправка τ_n шкалы времени потребителя, относительно системной шкалы, а также составляющие вектора скорости $\dot{x}, \dot{y}, \dot{z}$. Существенно, что перечисленные величины не могут быть непосредственно измерены радиотехническими

методами. Поэтому в навигационной аппаратуре потребителя (НАП) ГНСС реализован косвенный метод: измеряются некоторые параметры принятого радиосигнала – время его прихода t , фаза φ или разность фаз $\Delta\varphi$, доплеровский сдвиг частоты F_d , которым сопоставляются функционально связанные с ними величины (дальность R до навигационного космического аппарата (НКА), его радиальная скорость V_r , разность дальностей ΔR до нескольких НКА, угол визирования ϕ , угловая скорость Ω), по которым и рассчитываются искомые компоненты вектора состояния.

Измеряемые в интересах решения навигационной задачи параметры радиосигнала получили название радионавигационных параметров (РНП), а сопоставляемые им параметры вектора состояния потребителя – навигационных параметров (НП). Соответствующие функциональные зависимости между ними получили название навигационных функций. Точку в пространстве, относительно которой производится измерение НП или РНП, в радионавигации принято называть опорной радионавигационной точкой.

Очевидно, что вектор состояния потребителя может быть полностью определен, если его мерность не превышает числа независимых измерений РНП.

В системах ГЛОНАСС и GPS используются в основном дальномерный (псевдодальномерный) и радиально-скоростной методы измерений. В качестве подвижных опорных радионавигационных точек (ОРНТ) используются НКА. В этом случае радионавигационными параметрами являются время распространения (задержка) τ сигнала на трассе «НКА – потребитель» и доплеровское смещение частоты (ДСЧ) F_d . Соответствующая им дальность «НКА–потребитель» R или радиальная скорость потребителя относительно НКА V_r – являются навигационными параметрами, а связывающие их навигационные функции в данном случае имеют вид: $R = c\tau$, $V_r = F_d / \lambda$.

В общем случае вид навигационных функций определяется многими факторами: видом НП, параметрами движения НКА и потребителя, выбранной системой координат и т.д.

Геометрическое место точек пространства с одинаковым значением навигационного параметра называют поверхностью положения. Пересечение двух поверхностей положения определяет линию положения, то есть геометрическое место точек, соответствующих двум значениям двух навигационных параметров. Местоположение потребителя определяется координатами точки пересечения трех поверхностей положения или двух линий положения. Если из-за неоднозначности измерений линии положения пересекаются более чем в одной точке, то необходимо использовать дополнительную поверхность положения или априорную информацию, позволяющую отфильтровать истинное положение от ложных.

В качестве основных позиционных методов определения координат в ГНСС второго поколения в НАП обычно используются псевдодальномерный или разностно-дальномерный методы, а для получения составляющих вектора скорости потребителя применяют псевдорadiально-скоростной (псевдодоплеровский) метод. Использование более простого дальномерного метода навигационных определений нецелесообразно из-за отсутствия в большинстве моделей НАП ГНСС компактных и дешевых высокостабильных эталонов времени (частоты).

Использование ретрансляции сигналов НКА расширяет число позиционных методов, подходящих для решения НЗ, по сравнению с традиционными методами решения задач координатно-временных определений в ГНСС. Применение других методов становится возможным по двум основным причинам: за счет измерений относительно новых ОРНТ, в качестве которых могут использоваться несколько наземных измерительных пунктов (НИП) с известными координатами; за счет использования особенностей движения ретранслятора относительно НИП.

Очевидно, что основными методами для решения НЗ по ретранслированным сигналам НКА ГНСС останутся различные варианты дальномерных измерений. Однако при решении задач внешнетраекторных измерений (ВТИ) высокодинамичных летательных аппаратов с ретрансляторами на борту перспективными представляются и доплеровские методы

определения не только составляющих скорости, но и координат контролируемого объекта.

Дальномерные методы определения координат при использовании ретранслированных сигналов

При ретрансляции сигналов ГНСС в качестве НП, соответствующих временным задержкам радиосигналов, могут быть использованы для обработки следующие величины: псевдодальности, суммы псевдодальностей «НКА – Р» и «Р – НИП» и разности псевдодальностей или разности сумм псевдодальностей. В результате решения соответствующих навигационных уравнений могут быть получены компоненты вектора положения испытываемого средства (то есть ретранслятора), а при необходимости и временной интервал, равный сумме расхождения шкал времени НКА, НИП и задержки сигнала в ретрансляторе (Р).

Рассмотрим вначале возможные навигационные функции указанных выше радионавигационного параметра (РНП) для определения координат отдельно по прямым и отдельно по ретранслированным сигналам НКА ГНСС.

Под псевдодальностью от i -го НКА до потребителя понимают измеренную дальность \overline{R}_i этого НКА, отличающуюся от истинной дальности R_i на неизвестную, но постоянную за время определения навигационных параметров величину δR . Таким образом, для псевдодальности до i -го НКА можно записать

$$\overline{R}_i = \sqrt{(x_{ci} - x)^2 + (y_{ci} - y)^2 + (z_{ci} - z)^2} + c\tau_n, \quad (1)$$

где: $1 \leq i \leq n$.

Здесь x_{ci}, y_{ci}, z_{ci} – известные на момент измерения координаты i -го НКА (с учетом его перемещения за время распространения сигнала); x, y, z – координаты потребителя; c – скорость распространения радиоволн; τ_n – смещение временной шкалы потребителя относительно системного времени.

В псевдодальномерных методах (ПДМ), основанных на измерениях псевдодальностей, в качестве навигационного параметра выступает \overline{R}_i . Поверхностью положения является сфера с центром в точке центра масс НКА, а радиус этой сферы отличается на неизвестную величину δR . Измерение псевдодальностей до трех НКА приводит к системе трех уравнений с четырьмя неизвестными $x, y, z, \delta R$. В решении этой системы уравнений возникает неопределенный параметр, и для устранения возникшей неопределенности необходимо провести дополнительное измерение, то есть измерить псевдодальность до четвертого спутника. Полученная таким образом система четырех уравнений имеет точное решение, и, следовательно, местоположение потребителя при измерениях псевдодальностей определяется как точка пересечения четырех поверхностей положения.

Псевдодальномерный метод не накладывает жестких ограничений на значение погрешности $\delta R = c\tau_n$ (погрешности временной шкалы) и позволяет одновременно с определением местоположения вычислять отклонение шкалы времени потребителя.

Псевдодальномерный метод по сигналам ретранслятора

Формальный вид навигационной функции ПДМ одинаковый при использовании прямых или ретранслированных сигналов НКА. Несмотря на то, что общая задержка сигнала на трассе «НКА-Р-НИП» физически соответствует сумме дальностей «НКА – Р» и «Р – НИП», в качестве НП может быть выбрана псевдодальность $\overline{R_{ij}}$. Поверхностью положения по-прежнему будет сфера с центром в точке центра масс НКА, но радиус этой сферы изменен на неизвестную величину $\overline{R_{ij}} = R_{ij} + \delta R_{ij}$. Однако кроме составляющей, характеризующей разность шкал времени $c\tau_n$, в составе δR_{ij} будет присутствовать неизвестная задержка равная расстоянию R_{pj} от Р до НИП. Уравнение для НП

$$\overline{R_{ij}} = R_{ij} + \delta R_{ij} = R_{ij} + c\tau_n + R_{pj}, \quad (2)$$

где

$$R_{ij} = \sqrt{(x_{ci} - x_j)^2 + (y_{ci} - y_j)^2 + (z_{ci} - z_j)^2},$$

$$R_{pj} = \sqrt{(x_n - x_j)^2 + (y_n - y_j)^2 + (z_n - z_j)^2}$$

где x_j, y_j, z_j – координаты j-го ретранслятора; x_n, y_n, z_n – координаты НИП.

Метод предполагает сохранение информации о радионавигационных параметрах, характеризующих положение Р, в процессе переизлучения сигналов не менее четырех НКА на НИП. Такому условию соответствует, например, широкополосный ретранслятор сигналов НКА одной из ГНСС. Измеритель приемной аппаратуры НИП в этом случае определяет псевдодальности по задержке сигнала на трассе «НКА-Р-НИП».

В случае определения координат Р привязка НИП необязательна, и он может перемещаться в процессе ВТИ. К недостаткам данного метода следует отнести, прежде всего, необходимость приема и ретрансляции сигналов не менее четырех НКА ГНСС, усложнение процедуры поиска ретранслированных сигналов, особенно для высокодинамичных летательных аппаратов, за счет существенного изменения доплеровского сдвига частоты сигналов НКА после ретрансляции.

Разностно-дальномерный метод по сигналам НКА

Метод основан на измерении разности дальностей от потребителя до одного или нескольких НКА. По своей сути этот метод аналогичен псевдодальномерному, так как его целесообразно использовать только при наличии в дальномерных измерениях неизвестных сдвигов δR , то есть когда фактически проводятся измерения псевдодальностей. Разностно-дальномерный метод (РДМ) использует три разности $\overline{\Delta R_{ik}} = \overline{R_i} - \overline{R_k}$ до четырех НКА, так как при постоянстве δR за время навигационных определений разности псевдодальностей равны разностям истинных дальностей, для определения которых требуется лишь три независимых уравнения. Навигационным параметром является $\overline{\Delta R_{ik}}$.

Поверхности положения определяются из условия $\overline{\Delta R_{ik}} = const$ и представляют собой поверхности двуполостного гиперболоида вращения, фокусами последнего являются

координаты опорных точек i и k (центров масс i - и k -го НКА). Расстояние между этими опорными точками называют *базой* измерительной системы. Если расстояния от ОРНТ (НКА) до потребителя велики по сравнению с размерами базы, то гиперboloид вращения в окрестности точки потребителя практически совпадает со своей асимптотой – конусом, вершина которого совпадает с серединой базы.

Точность определения координат потребителя совпадает с точностью определения этих координат псевдодальномерным методом [1, 2].

Недостатком разностно-дальномерного метода является то, что в нем не может быть измерено смещение δR , а, следовательно, и смещение шкалы времени потребителя.

Разностно-дальномерный метод по сигналам ретранслятора

Основное отличие данного метода от ПДМ – в процедуре формирования НП, поступающих в дальнейшую обработку

$$\overline{\Delta R_{ik}} = \overline{R_{ij}} - \overline{R_{kj}} = R_{ij} - R_{kj}.$$

В отличие от уравнений ПДМ в данном случае величина полной задержки не измеряется, что позволяет использовать в дальнейшем процедуры фильтрации, свободные от влияния временной нестабильности R_{pj} . Требования к аппаратуре Р и приемника НИП такие же, как и в ПДМ. Недостатки разностно-дальномерного метода, в основном, аналогичны указанным выше для псевдодальномерного.

Суммарно-дальномерный метод по сигналам ретранслятора

Данный метод может быть реализован при измерениях задержки только по ретранслированным сигналам НКА. По требованиям к аппаратуре и виду системы уравнений, решаемых на НИП, этот метод близок к псевдодальномерному. Основное отличие, определяющее особенность рассматриваемого метода, заключается в использовании суммы дальностей «НКА-Р» и «Р-НИП», а не псевдодальностей, что требует точной топографической привязки НИП и синхронизации его шкалы времени (ШВ) с системным временем ГНСС. Однако это уменьшает до трех минимальное число НКА, сигналы которых необходимо переизлучать для определения пространственных координат Р. Уравнения для НП данного метода имеют вид:

$$\Sigma R_{ij} = R_{ij} + R_{pj}.$$

Поскольку координаты НКА также известны из кадра служебной информации ГНСС, то поверхностью положения Р в данном случае будет эллипсоид с фокусами в точках расположения НИП и одного из трех НКА. Основной недостаток метода – необходимость координатно-временной привязки НИП.

Доплеровские методы определения скорости и координат при использовании ретранслированных сигналов

Кроме различных указанных выше вариантов дальномерных измерений в системах ВТИ могут быть использованы измерения частоты ретранслированных сигналов по аналогии с измерениями доплеровских сдвигов частоты сигналов НКА при определении вектора скорости в НАП. Однако в отличие от НАП ГНСС, в аппаратуре НИП по данным чисто доплеровских измерений возможно определение не только вектора скорости, но и координат ретранслятора [3, 4].

Радиальной скорости в соответствующем координатном пространстве также соответствует сферическая поверхность положения. В таком пространстве свойства радиально-скоростного метода были бы подобны свойствам дальномерного метода, рассматриваемого в линейном трехмерном пространстве. Однако поскольку при навигационных расчетах навигационные решения реализуются в обычном координатном пространстве, то необходимо скоростные поверхности положения фиксировать именно в данном пространстве. Для этого значение параметра \dot{R} , м/с, следует привести либо к длине, либо к относительной угловой мере. Удобнее выразить его безразмерной величиной, в долях модуля относительной скорости $\dot{R}^* = \dot{R}/|V_c|$, где V_c – вектор скорости НКА, модуль которого известен из передаваемой НКА служебной информации:

$$|V_c| = (\dot{x}_c + \dot{y}_c + \dot{z}_c)^{0,5}.$$

Учитывая, что радиальная скорость выражается через модуль скорости НКА и угол α , составленный вектором V_c и направлением от НКА в точку наблюдения, получаем значение приведенного НП в виде

$$\dot{R}_i^* = \cos \alpha_i. \quad (3)$$

Поверхности положения, удовлетворяющие условию (3), представляют собой конусы, описанные относительно вектора V_c , с раствором $2 \arccos(\dot{R}/|V_c|)$. Угол α при движении НКА относительно наблюдателя изменяется в пределах $0 \dots \pi$, при предельных его значениях поверхности положения вырождаются в лучи, совпадающие с вектором $\pm V_c$, а при $\alpha = \pi/2$ – в плоскость, перпендикулярную вектору V_c . Последнему случаю, относящемуся к так называемому траверзному положению, соответствует значение $\dot{R} = 0$, а стало быть, и $F_d = 0$. Очевидно, что для подобного представления поверхностей положения, соответствующих параметру \dot{R} , требуется знание годографа скорости НКА, который должен рассчитываться по эфемеридам.

Псевдоразрадиально-скоростной метод по сигналам НКА

Псевдоразрадиально-скоростной (псевдодоплеровский) метод позволяет в ГНСС определять вектор скорости потребителя в присутствии неизвестного смещения частоты сигнала, например, из-за нестабильности эталона частоты в НАП. При наличии такого смещения $\delta\dot{R}_i$ выражение для радиальной скорости можно представить в виде двух слагаемых:

$$\dot{\bar{R}}_i = \dot{R}_i + \delta\dot{R}_i = [(x_{ci} - x)(\dot{x}_{ci} - \dot{x}) + (y_{ci} - y)(\dot{y}_{ci} - \dot{y}) + (z_{ci} - z)(\dot{z}_{ci} - \dot{z})]/R_i + \delta\dot{R}_i \quad (4)$$

Здесь компоненты $\{(\dot{x}_{ci} - \dot{x}), (\dot{y}_{ci} - \dot{y}), (\dot{z}_{ci} - \dot{z})\}$ характеризуют вектор относительной скорости; R_i – относительные координаты потребителя. По своей идее метод аналогичен псевдодальномерному методу определения координат потребителя. Для нахождения вектора скорости потребителя $\{\dot{x}, \dot{y}, \dot{z}\}$ и поправки $\delta\dot{R}_i = \lambda \Delta F_i$ необходимо провести измерения по четырем НКА и решить систему четырех уравнений вида (4). Для ее решения потребуются знания дальностей R_i , и координат $\{x, y, z\}$ потребителя.

Псевдорадiallyно-скоростной метод по сигналам ретранслятора

Псевдорадiallyно-скоростной (псевдодоплеровский) метод при измерении РНП только по ретранслированным сигналам НКА позволяет определять вектор скорости Р таким же образом, как и при использовании в работе по прямым сигналам НКА, то есть решая систему уравнений вида (4). Однако возникновение неизвестного смещения частоты сигнала $\delta\dot{R}_{ij}$ будет определяться не только нестабильностью эталона частоты в НИП, но и скоростью относительного движения Р относительно НИП. Влияние последнего фактора, в основном, определяется выбранной схемой преобразования сигнала НКА в аппаратуре Р. В частности, при использовании широкополосного Р, выражение для смещения частоты $\delta\dot{R}_{ij}$ для радиальной скорости можно представить в виде двух слагаемых $\delta\dot{R}_{ij} = \lambda \Delta F_i + \lambda F_{\text{дон } p}$, из которых первое, как и раньше, зависит от разности частот ОГ НКА и НИП, а второе определяется дополнительным смещением частоты на трассе Р-НИП.

Для определения составляющих скорости Р $\{\dot{x}_j, \dot{y}_j, \dot{z}_j\}$ необходимо провести измерения по четырем НКА и решить систему четырех уравнений вида (4). Для ее решения потребуются знания дальностей R_{ij} и координат $\{x_j, y_j, z_j\}$ Р, которые могут быть найдены ранее из псевдодальномерных измерений (1).

Для определения составляющих скорости НАП $\{\dot{x}_n, \dot{y}_n, \dot{z}_n\}$ относительно j -го Р с известными координатами (вектором скорости) можно продифференцировать по времени (2).

$$\begin{aligned}\dot{R}_{ij} &= \dot{R}_{ij} + \dot{R}_{pj} + \lambda \Delta F_i, \\ \dot{R}_{ij} &= [(x_{ci} - x_j)(\dot{x}_{ci} - \dot{x}_j) + (y_{ci} - y_j)(\dot{y}_{ci} - \dot{y}_j) + (z_{ci} - z_j)(\dot{z}_{ci} - \dot{z}_j)] / R_{ij}, \\ \dot{R}_{pj} &= [(x_n - x_j)(\dot{x}_n - \dot{x}_j) + (y_n - y_j)(\dot{y}_n - \dot{y}_j) + (z_n - z_j)(\dot{z}_n - \dot{z}_j)] / R_{pj}.\end{aligned}$$

Поскольку псевдодоплеровский метод аналогичен псевдодальномерному, он имеет такие же достоинства и недостатки: возможность перемещения НИП в процессе ВТИ и усложнение процедуры поиска и сопровождения ретранслированных сигналов от высокодинамичных ЛА, что может увеличить погрешности измерения доплеровского сдвига частоты сигналов НКА после ретрансляции.

Разностно-доплеровский метод

Основное отличие от предыдущего метода при определении составляющих вектора скорости потребителя (НАП) $\{\dot{x}, \dot{y}, \dot{z}\}$ или Р $\{\dot{x}_j, \dot{y}_j, \dot{z}_j\}$ – в процедуре формирования радионавигационных параметров, поступающих в дальнейшую обработку, соответственно:

$$\begin{aligned}\Delta\dot{R}_{ik} &= \dot{R}_i - \dot{R}_k \text{ или} \\ \Delta\dot{R}_{ik} &= \dot{R}_{ij} - \dot{R}_{kj}.\end{aligned}$$

В отличие от уравнений псевдодоплеровского метода в данном случае величина полного смещения частоты не измеряется, что позволяет использовать в дальнейшем процедуры фильтрации, свободные от влияния временной нестабильности $\delta\dot{R}_i = \lambda \Delta F_i$ или $\delta\dot{R}_{ij} = \lambda \Delta F_i + \lambda F_{\text{дон } p}$ при условии одинаковой величины ΔF_i для разных НКА.

Суммарно-доплеровский метод

По аналогии с суммарно-дальномерным методом реализуем только по ретранслированным сигналам НКА. По требованиям к аппаратуре и виду системы уравнений, решаемых на НИП, данный метод полностью аналогичен псевдодоплеровскому. Основное отличие, определяющее особенность рассматриваемого метода, заключается в требовании не только точной топографической привязки НИП и синхронизации его ШВ с системным временем ГНСС, но и привязки номинала частоты ОГ НИП относительно стандарта частоты ГНСС. При этих условиях значение $\lambda \Delta F_i$ известно, и для определения скорости необходимо измерять:

$$\Sigma \dot{R}_{ij} = \dot{R}_{ij} + \dot{R}_{pj}.$$

Поскольку координаты НКА и составляющие его вектора скорости также известны из кадра служебной информации ГНСС, то для определения вектора скорости $P \{ \dot{x}_j, \dot{y}_j, \dot{z}_j \}$ достаточно измерений суммарной доплеровской частоты по ретранслированным сигналам до трех НКА при условии определенных ранее координат P [5].

Основной недостаток метода – необходимость координатно-временной привязки НИП.

Выводы

1. Использование ретрансляции сигналов НКА расширяет число позиционных методов, применимых для решения НЗ, по сравнению с традиционными методами решения задач навигационно-временных определений в ГНСС.

2. При решении задач ВТИ высокодинамичных ЛА с ретрансляторами на борту, наряду с различными вариантами дальномерных измерений перспективными являются и доплеровские методы определений.

3. Включение в НИП каналов приема сигналов непосредственно от НКА позволяет эффективно использовать их в качестве независимого источника вспомогательных данных.

4. Организация приема прямых и ретранслированных сигналов ГНСС одновременно на несколько разнесенных в пространстве НИП позволяет сократить число НКА, необходимых для определения координат ретранслятора.

5. Совместное использование разностно-доплеровского метода и суммарно-дальномерного при приеме сигналов на разнесенные НИП позволяет сократить минимально необходимое число ретранслируемых сигналов НКА до одного.

6. В случае расположения ретранслятора близко к линии визирования НКА с наземного измерительного пункта условия для использования суммарно-дальномерного метода будут наилучшими.

7. Использование традиционных методов дифференциальной коррекции для объектов, совершающих полет на высотах более 100 км, вносит методическую погрешность в результаты измерений.

8. Предложен способ дифференциальной коррекции сигналов ГНСС, ретранслируемых с объекта РКТ, повышающий точность измерений за счет учета разницы ионосферных слоёв для НИП и ретранслятора.

Литература

1. Иванов А.И., Романов Л.М. Полигонные навигационные измерения с использованием спутниковой радионавигационной системы NAVSTAR // Зарубежная радиоэлектроника. 1989. № 11. С. 16–29.

2. Сетевые спутниковые радионавигационные системы /под ред. В.С. Шебшаевича. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Радио и связь, 1993. 408 с.

3. Thompson T. Performance of the SATRACK/GPS TRIDENT I Missile Tracking System. IEEE Position, Location and Navigation Symposium. Dec. 1980. 445 p.
4. Бабуров В.И., Иванцевич Н.В., Васильева Н.В. и [др.] Анализ влияния точности координатно-временной привязки носителя псевдоспутника на характеристики навигационного поля СРНС + ПС // Интегральные навигационные системы: сб. тр. 13-й Междунар. конф. СПб.: ЦНИИ «Электроприбор», 2006.
5. Власов И.Б., Гребенников А.В., Завгородний Д.В. и [др.] Методика и результаты аттестации канала ретрансляции сигналов СРНС // Радиолокация, навигация и связь: сб. тр. Междунар. конф. Воронеж, 2004. С. 1674–1684.