

УДК 621.396.9:629.7

Хомяков Э. Н. докт. техн. наук, профессор, Трикоз Д. В. ,
Омелаенко О. В. , Золотарев В. Н. , Кащенко В. С. ,
Сокольников А. В. , Хомякова Е. Э.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ОЦЕНКИ ТОЧНОСТИ КООРДИНАТНО-
ВРЕМЕННОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ АЭРОКОСМИЧЕСКИХ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ
СПУТНИКОВЫХ РАДИОНАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ

В настоящее время во всем мире усиливается внимание к спутниковым радионавигационным системам (СРНС) нового поколения NAVSTAR, ГЛОНАСС. С декабря 1993 года СРНС NAVSTAR полностью развернута, оперируя с орбитальной группировкой из 21 рабочего и 3-х резервных навигационных искусственных спутников Земли (НИСЗ) [GPS World, January 1994]. В СРНС ГЛОНАСС по состоянию на 30 января 1994 года в штатном режиме функционируют 15 НИСЗ, параметры орбит которых приведены в таблице 1.

С целью анализа потенциальной точности координатно-временного обеспечения (КВО) потребителей с использованием СРНС типа NAVSTAR в лаборатории СРНС кафедры 502 ХАИ создан пакет прикладных программ (ППП) NKS_TR. Данный пакет предусматривает моделирование орбит 24-х НИСЗ, траектории баллистического летательного аппарата (ЛА), ввод данных о погрешностях измерений, о возмущениях траектории ЛА. Потенциальная точность КВО определяется как на основе метода максимального правдоподобия, так и алгоритма фильтра Калмана. В состав ППП входят четыре программы.

В программе nks_tr6 вектор состояния объекта представляет собой координаты и скорости ЛА в гринвичской геоцентрической системе координат (ГГСК). Вектор измеряемых функций включал три разности псевдодальностей

и три разности псевдоскоростей при работе по 4-м НИСЗ с наилучшей геометрией. В программе nks_tr8 вектор состояния включает дополнительно расхождения шкал времени и частот аппаратуры потребителя относительно системной шкалы времени, эталонной частоты. Вектор измерений состоит из 4-х псевдодальностей и 4-х псевдоскоростей. Программа nks_tr10 учитывает возможность дополнительных двух измерений псевдодальности и псевдоскорости относительно наземного псевдоспутника. Программа nks_tr16 позволяет моделировать СРНС при 4-х псевдоспутниках. Модификации данной программы позволяют включить в состав источников навигационных сигналов вместо наземного псевдоспутника геостационарный ИСЗ (ГИСЗ). Все программы данного ППП предусматривают два режима работы: с обработкой на борту ЛА и с обработкой на наземной станции.

Для оценки потенциальной точности небаллистических объектов разработан ППП NKS_TS, отличающийся от предыдущего модулем формирования траектории контролируемого объекта, в качестве которого выбран самолет.

Результаты экспериментов, проведенных с помощью ППП NKS_TR для космического аппарата (КА) на околополярной околокруговой орбите с высотой порядка 1,5 тыс. км при погрешностях дальномерных измерений 1 м и скоростных измерений 1 см/с свидетельствуют о высокой точности определения координат КА ($\pm 0,3$ м) и составляющих вектора скорости ($\pm 0,6$ см/с), расхождений шкал времени ($\pm 2-4$ нс) при работе по 4-м НИСЗ и 4-м псевдоспутникам. Практически потенциальные характеристики обеспечивает комплекс только с одним псевдоспутником и 4-мя НИСЗ. Несколько хуже работает комплекс при использовании 2-х НИСЗ, одного псевдоспутника и одного ГИСЗ. Однако даже при такой конфигурации точность определения координат составляет менее 1 м.

Значительно хуже решается задача КВО КА при использовании только наземных псевдоспутников, размещенных в пределах территории Украины при

максимально возможном пространственном разnose. Качество КВО ухудшается на порядок по сравнению с комплексом, использующим НИСЗ. Этот результат убеждает в целесообразности использования СРНС для контроля траектории околоземных КА в дополнение к средствам наземного автоматизированного комплекса управления КА (НАКУ КА). Для более полной оценки точности КВО КА разработан ППП GLONASS_TR. Данный ППП позволяет производить:

- расчет траекторий НИСЗ ГЛОНАСС по данным альманаха, принятого аппаратурой А-724М-01;

- расчет возмущенной траектории контролируемого КА;

- планирование сеанса навигационных измерений;

- формирование массива измерительной информации с заданными статистическими характеристиками;

- обработку измерительной информации методом калмановской фильтрации.

Предполагается, что обработка осуществляется на наземной станции. Вектор измерений включает псевдодальности и псевдоскорости относительно 4-х НИСЗ с наилучшим геометрическим фактором. Вместо НИСЗ имеется возможность включать в рабочее созвездие наземный псевдоспутник или ГИСЗ. При обработке на интервале времени 200с с шагом 2с среднеквадратическая ошибка (СКО) оценок координат КА составила 0,7м, а составляющих скорости - 1,2м/с. При сокращении объема выборки в 5 раз, то есть при наблюдении на интервале времени 20 минут с шагом 60 секунд, СКО составили величины 2,8м и 2,2 см/с соответственно.

Существенное повышение точности оценки координат и составляющих вектора скорости околоземного КА имеет место при работе по всем видимым НИСЗ.

Моделирование выявило значительные систематические погрешности в КВО потребителей, обусловленные медленноменяющимися погрешностями измерений, дополнительным запаздыванием сигнала в тропосфере и ионосфере,

релятивистским и гравитационным эффектами.

С целью экспериментальной оценки уровня медленноменяющихся и флуктуационных погрешностей оценок координат потребителей разработан ППП ОБРАБ. Экспериментальные данные в виде значений геодезической долготы, широты и высоты над поверхностью общего земного эллипсоида, полученные с помощью аппаратуры А-724М-01, пересчитываются в гринвичские координаты и подвергаются обработке:

- с использованием алгебраических полиномов степени n ;
- с использованием ортогональных полиномов Чебышева степени n .

При наличии информации о геометрическом факторе реализуется алгоритм взвешенной полиномиальной обработки данных по полной выборке. При этом оцениваются коэффициенты полиномов, сам полином, определяются точностные характеристики как входных, так и выходных данных.

В данный ППП входит программа калмановской фильтрации в реальном времени, позволяющая оценивать координаты и три первые их производные.

Обработка реальных данных позволяет сделать вывод, что за сеанс связи порядка 30 минут систематические погрешности оценок координат объектов изменяются в пределах до 50 м. Уровень флуктуационных ошибок колеблется от нескольких дециметров, до единиц метров. Качество обработанных данных на порядок выше.

Объективная оценка уровня флуктуационных ошибок получена на основе обработки данных с двух комплектов аппаратуры А-724М-01. При известном расстоянии между антеннами двух комплектов находились оценки этого расстояния, полученные либо непосредственно, либо после полиномиальной обработки. СКО оценок расстояния между антеннами от их истинного значения составляет величину порядка 20-60 см. По-существу, реализован метод относительного эталонирования при оценке качества КВО потребителя СРНС.

Следует отметить целесообразность применения многоантенной аппаратуры потребителей с приемником, работающим в мультиплексном режиме. Помимо объективной оценки уровня флуктуационных погрешностей имеется возможность определения пространственной ориентации объекта, несущего такую аппаратуру.

В разработке вышеописанных ППП также принимали участие студенты старших курсов Дубовой А. Ю., Мельник В. Г., Шевкунов В. Г., Рябикин В. П., Луцаев Ф. В., Корниенко М. В., Зинов А. А., Толстов А. А., Опанасюк П. В. Все программы используются при проведении учебно-исследовательских работ по курсу "Спутниковые радионавигационные системы" на кафедре 502.

Таблица 1.

1122 (Almanah Date - 26 Jan 1995.)

| num | t0m | T | e | i | 0m | arg | Tv |
|-----|-----------|-----------|------------|----|----|------|-------------------------------------|
| 1 | 02912.124 | 40544.230 | 0.00067042 | 64 | 58 | 43.4 | 009 43 10.0 192 01 08.5 -0.00189208 |
| 2 | 07792.248 | 40544.162 | 0.00065422 | 64 | 59 | 11.2 | 349 11 38.7 182 24 01.8 -0.00195322 |
| 3 | 12918.874 | 40544.146 | 0.00297546 | 64 | 55 | 22.0 | 327 51 38.5 187 25 16.5 -0.00195312 |
| 4 | 17981.530 | 40544.246 | 0.00017832 | 64 | 54 | 04.1 | 306 42 23.4 312 04 19.7 -0.00201416 |
| 5 | 24572.998 | 40544.778 | 0.00076674 | 65 | 01 | 48.8 | 279 32 08.2 277 31 52.0 -0.00201416 |
| 6 | 28070.280 | 40544.160 | 0.00122328 | 64 | 54 | 38.7 | 264 34 08.3 328 27 48.6 -0.00201416 |
| 8 | 38028.748 | 40543.964 | 0.00167264 | 64 | 58 | 49.0 | 222 58 50.6 021 26 23.3 -0.00201416 |
| 12 | 16322.592 | 40543.884 | 0.00096988 | 64 | 47 | 36.0 | 078 18 48.5 120 48 59.9 0.00103758 |
| 14 | 26439.124 | 40543.844 | 0.00037002 | 64 | 47 | 14.4 | 031 03 42.4 051 57 55.1 0.00115966 |
| 16 | 36563.062 | 40543.836 | 0.00158690 | 64 | 46 | 50.9 | 348 46 31.4 002 57 58.7 0.00122070 |
| 17 | 39894.312 | 40544.032 | 0.00043486 | 64 | 47 | 36.0 | 095 12 54.2 175 10 56.9 0.00054930 |
| 18 | 04416.124 | 40544.082 | 0.00122642 | 64 | 46 | 34.2 | 243 28 28.9 039 11 37.4 0.00079344 |
| 21 | 19741.936 | 40544.096 | 0.00082396 | 64 | 55 | 15.8 | 179 00 34.2 334 19 29.8 0.00073242 |
| 23 | 29765.936 | 40543.998 | 0.00271414 | 64 | 47 | 07.6 | 137 32 16.2 202 51 45.1 0.00067138 |
| 24 | 34813.030 | 40544.004 | 0.00041866 | 64 | 54 | 33.8 | 116 00 50.6 296 48 23.9 0.00061034 |