

УДК 621.396

АЛГОРИТМЫ ОБРАБОТКИ РЕТРАНСЛИРОВАННЫХ НАВИГАЦИОННЫХ СИГНАЛОВ В ЗАДАЧЕ ОЦЕНИВАНИЯ ПОЛНОГО ЭЛЕКТРОННОГО СОДЕРЖАНИЯ В ИОНОСФЕРЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НАНОСПУТНИКА-РЕТРАНСЛЯТОРА

КАПЛЯРЧУК Е. А., КОЗЛОВ С. В.

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
(г. Минск, Беларусь)*

Аннотация. Предложены алгоритмы обработки ретранслированных с наноспутника-ретранслятора (СР) навигационных сигналов глобальной навигационной системы GPS на выделенные для геофизических исследований частоты 150/400 МГц. На основе разработанной кинематической модели взаимного пространственного перемещения навигационных спутников (НС), СР и наземного приемного пункта (ПП) показано, что модули производных суммарной дальности между элементами системы на трассе НС-СР-ПП могут достигать 5...8 км/с, 200...250 м/с² и 5...6 м/с³, что приводит к существенной фазовой модуляции ретранслированного сигнала и миграции дальности. Приведена структура алгоритма цифровой обработки, предусматривающая демодуляцию по оценке навигационного сообщения, получаемого от совмещенного приемника прямого навигационного сигнала, и фазе сигнала, обусловленной детерминированным перемещением элементов системы за время накопления, разделение сигнала на периоды повторения, компенсацию междупериодной миграции дальности, сжатие по дальности для каждого периода повторения и междупериодное накопление сигнала в отсчетах дискретного преобразования Фурье.

Abstract. Algorithms for processing retransmitted from a nanosatellite-relay (SR) navigation signals of the global navigation system GPS to frequencies of 150/400 MHz allocated for geophysical research are proposed. On the basis of the developed kinematic model of the mutual spatial movement of navigation satellites (NS), SR and the ground receiving point (RP), it is shown that the modules of the derivatives of the total range between the elements of the system on the NS-SR-RP path can reach 5...8 km/s, 200... 250 m/s² and 5...6 m/s³, which leads to significant phase modulation of the relayed signal and range migration. The structure of the digital processing algorithm is given, which provides for demodulation based on the estimation of the navigation message received from the combined direct navigation signal receiver and the signal phase due to the deterministic movement of the system elements during the accumulation time, signal separation into repetition periods, compensation for interperiod range migration, range compression for each repetition period and interperiod accumulation of the signal in samples of the discrete Fourier transform.

Постановка задачи

В [1,2] предложены способ оценки полного электронного содержания (ПЭС) в ионосфере на трассах «навигационный спутник GPS – наноспутник-ретранслятор» и «наноспутник-ретранслятор» на основе перекрестной ретрансляции навигационных сигналов. Обнаружение ретранслированного сигнала, измерение разности времен задержки и достижение высокой точности оценивания ПЭС может быть достигнуто при достаточно высоком отношении сигнал/шум при большом времени когерентного накопления (КН). Это требует обоснования соответствующих цифровых алгоритмов обработки ретранслированных навигационных сигналов, что и является целью настоящей статьи.

Основной особенностью алгоритмов обработки принимаемого ретранслированного сигнала является необходимость его когерентного накопления в течении 0,5...1,0 с [1,2], то есть за интервал времени, в течении которого взаимное пространственное положение - суммарная дальность НС-СР-ПП ее первая и вторая производная (радиальная скорость) могут существенно изменяться. В это ситуации будут иметь место явления миграции дальности (МД) и миграции частоты (МЧ), характерные, в частности, для РЛС с синтезированием апертуры [3-5]. Это обуславливает необходимость разделения решаемой задачи на две части: обоснование кинематической модели взаимного перемещения элементов системы [6] и обоснования собственно алгоритмов когерентного накопления ретранслированного сигнала.

Кинематическая модель взаимного перемещения элементов системы

При обосновании способов обработки при длительном накоплении принимаемых сигналов наиболее важным является вопрос аппроксимации суммарной дальности $\tilde{r}(t) = \tilde{r}_1(t) + \tilde{r}_2(t)$ между НС и СР (r_1) и между СР и СПД (r_2) и каждой из ее составляющих. Для относительно коротких (единицы секунд) временных интервалов для аппроксимации составляющих дальности может быть принята модель вида [6]

$$\tilde{r}_{1(2)}(t) = \tilde{r}_{01(2)} + V_{0r1(2)}(t - t_0) + \frac{1}{2} a_{r1(2)}(t - t_0)^2 + \frac{1}{6} a'_{r1(2)}(t - t_0)^3 + \dots, \quad (1)$$

где $r_{01(2)} = r_{1(2)}(t_0)$ - начальная дальность; $V_{0r1(2)} = \left. \frac{d}{dt} r_{1(2)}(t) \right|_{t=t_0}$ - начальная радиальная скорость; $a_{r1(2)} = \left. \frac{d^2}{dt^2} r_{1(2)}(t) \right|_{t=t_0}$ - начальное радиальное ускорение; $r_{1(2)}(t)$ - закон изменения дальности между соответствующими точками.

При анализе законов $r_{1(2)}(t)$ рассматривалось движение НС, СР и ПП в неподвижной геоцентрической системе координат. На рисунке 1 приведен типовой закона изменения дальности между СР и ПП и угла между радиусом-вектором на центр Земли и направлением на СР при наблюдении с ПП.

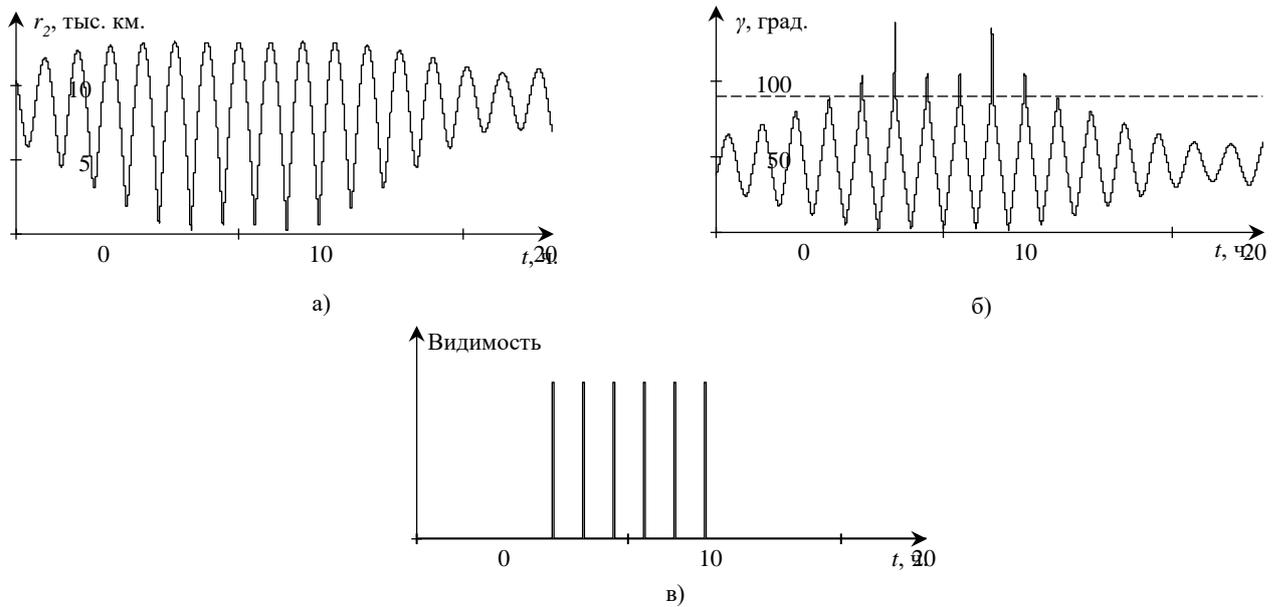
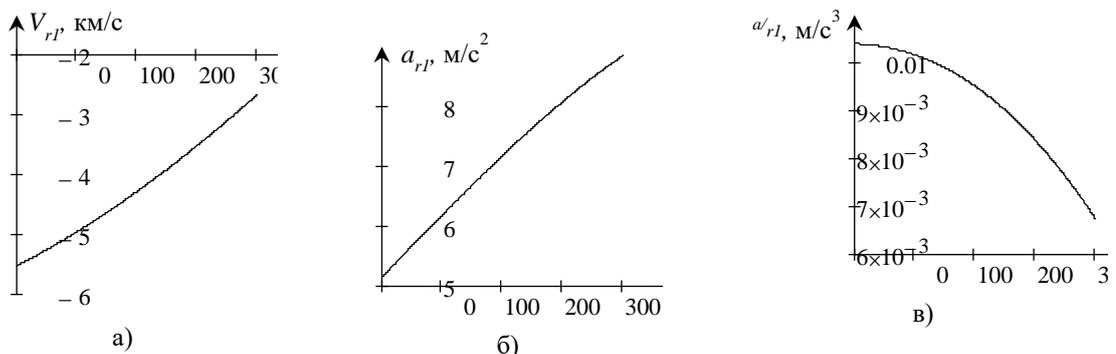


Рис. 1. Закон изменения дальности между СР и ПП (а), угол между направлением на центр Земли и направлением на СР при наблюдении с ПП (б) и интервалы видимости СР с ПП (в)



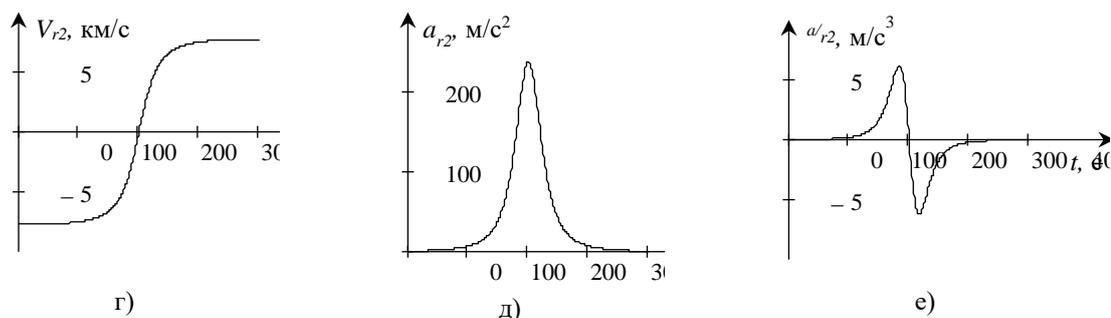


Рис. 2. Типовые законы изменения радиальных скоростей (а, г), ускорений (б, д) и производных ускорений (в, е)

В этом примере СР имел круговую орбиту с углом наклона 30° , высотой 200 км при орбитальной скорости 7785 м/с и периодом вращения 5303 с. ПП располагался на уровне моря в точке географической широтой $53,9^\circ$ с.ш. и двигалась в соответствии с вращением Земли. Характеристики одного из НС соответствовали ГНСС GPS. Координаты НС, СР и ПП рассчитывались с использованием типовых алгоритмов [6-9]. СР будет видимым, если этот угол превышает 90° (пунктирная линия на рисунке 1б). Расчеты проводились при угле наклона плоскости орбиты СР 60° , при которой суммарное время наблюдения близко к максимальному. На рисунке 2 для одного из интервалов видимости ($t_0=7,754$ часа, графики на интервале времени 500 с приведены для времени $t-t_0$) приведены значения начальной радиальной скорости, радиального ускорения и производной радиального ускорения между одним из видимых НС и СР, а также между СР и ПП.

Прямая видимость между СР и ПП будет иметь место 5-6 раз за сутки при средней длительности каждого интервала времени наблюдения 300...500 с. Модули радиальных скоростей могут составлять до 5...6 км/с, модуль радиального ускорения при взаимном перемещении НС и СР может составлять до 10 m/s^2 , а для взаимного перемещения СР и ПП – до 250 m/s^2 . Модули производной радиального ускорения существенно меньше и близки к нулю для взаимного перемещения НС и СР и единицы m/s^3 для взаимного перемещения СР и ПП. Отметим, что при указанных модулях радиальной скорости и радиального ускорения необходимо учитывать явления миграции дальности и частоты, характерные, в частности, для радиолокаторов с синтезированием апертуры [10,11]. Разрешающие способности по радиальному ускорению и производной радиального ускорения составят [4,5] $\Delta a \approx 0,5\lambda / T_{\text{кн}}^2$; $\Delta a' \approx 0,5\lambda / T_{\text{кн}}^3$, что для ретранслированного сигнала с $\lambda=0,75$ м и $T_{\text{кн}}=0,5...1,0$ с дает $\Delta a=1,5...0,375$ m/s^2 и $\Delta a'=3,0...0,375$ m/s^3 . Как следует из зависимостей на рисунке 2, характерные значения радиальных скорости и ускорения на интервале видимости существенно превосходят разрешающие способности по указанным параметрам.

Таким образом, кинематическая модель показывает, что для аппроксимации дальности в рассматриваемой бистатической радиолокационной системе, паразитирующей на сигналах навигационной системы GPS, при времени наблюдения (накопления) порядка 0,5...1,0 с необходимо использовать полиномы третьей степени. Параметры указанных полиномов представляют собой радиальные скорости, ускорения и производные ускорений и используются для компенсации миграций дальности и частоты в процессе когерентного накопления ретранслированного навигационного сигнала на приемном пункте.

Алгоритмы когерентного накопления ретранслированного сигнала

При когерентном накоплении ретранслированного сигнала на любой из пар частот «частота навигационного сигнала/частота ретрансляции» [1] на приемном пункте после переноса на нулевую или промежуточную частоту необходимо исключить дополнительную фазовую модуляцию сигнала, вызванную навигационным сообщением $D(t)$ [7,11], выполнить компенсацию миграции доплеровской частоты, вызванной ненулевыми высшими производными суммарной дальности [3-5], скомпенсировать междупериодную миграцию (изменение) дальности в процессе наблюдения и провести накопление сигнала в узкополосных доплеровских фильтрах.

С учетом практически детерминированного движения СР по орбите при малых возмущениях [8], а также возможности периодического уточнения орбитальных параметров СР на основе ретранслированного сигнала [1], полагаем, что орбитальные параметры движения СР к началу каждого цикла наблюдения известны достаточно точно. Известными с высокой точностью являются также и координаты видимых НС [7,9,10], а также приемного пункта. Это позволяет определить ориентировочные значения параметров движения $V_{0r1(2)}, a_{r1(2)}, a'_{r1(2)}$ для каждого момента времени с точностью до нескольких значений разрешающих способностей $\Delta V=0,5\lambda / T_{\text{кн}}$; Δa ; $\Delta a'$ по радиальной скорости, ускорению и его

производной с организацией многоканальной обработки по указанным параметрам. Кроме того, известными считаются временной сдвиг $\Delta\tau_i(t) = (r_i(t) + r(t) - r_{0i}(t)) / c$ прямого навигационного сигнала от i -го видимого НС на дальности НС-ПП $r_{0i}(t)$ и ретранслированного навигационного сигнала.

Компенсацию миграции дальности и частоты можно выполнить во временной, с использованием, например, алгоритма *BackProjection* для радиолокатора с синтезированием апертуры, или спектральной области [3-5]. Так как частоты гетеродинов аппаратуры ретрансляции СР и ПП, в отличие от радиолокатора с синтезированием апертуры, могут заметно отличаться от номинальных значений (при долговременной нестабильности частоты порядка 10^{-7} принимаемый сигнал может иметь неконтролируемый сдвиг по частоте порядка нескольких сотен Гц), то применение *BackProjection* затруднительно, и предпочтительным является обработка в спектральной области с многоканальностью по начальной радиальной скорости (доплеровскому сдвигу частоты).

Структура предлагаемого алгоритма обработки в спектральной области для одной из пар частот «частота навигационного сигнала – частота ретранслируемого сигнала» для i -го НС приведена на рисунке 3.

Входными данными для алгоритма обработки являются отсчеты \dot{Y}_m принимаемого сигнала для моментов времени $t_m = m / F_s$, где $m = \overline{0, M_\Sigma - 1}$; M_Σ - число отсчетов в выборке; F_s - частота дискретизации на интервале времени до единиц секунд и ожидаемые значения радиальных скорости, ускорения и производной ускорения $V_{0r1(2)}, a_{r1(2)}, a'_{r1(2)}$ между НС и СР и между СР и ПП.

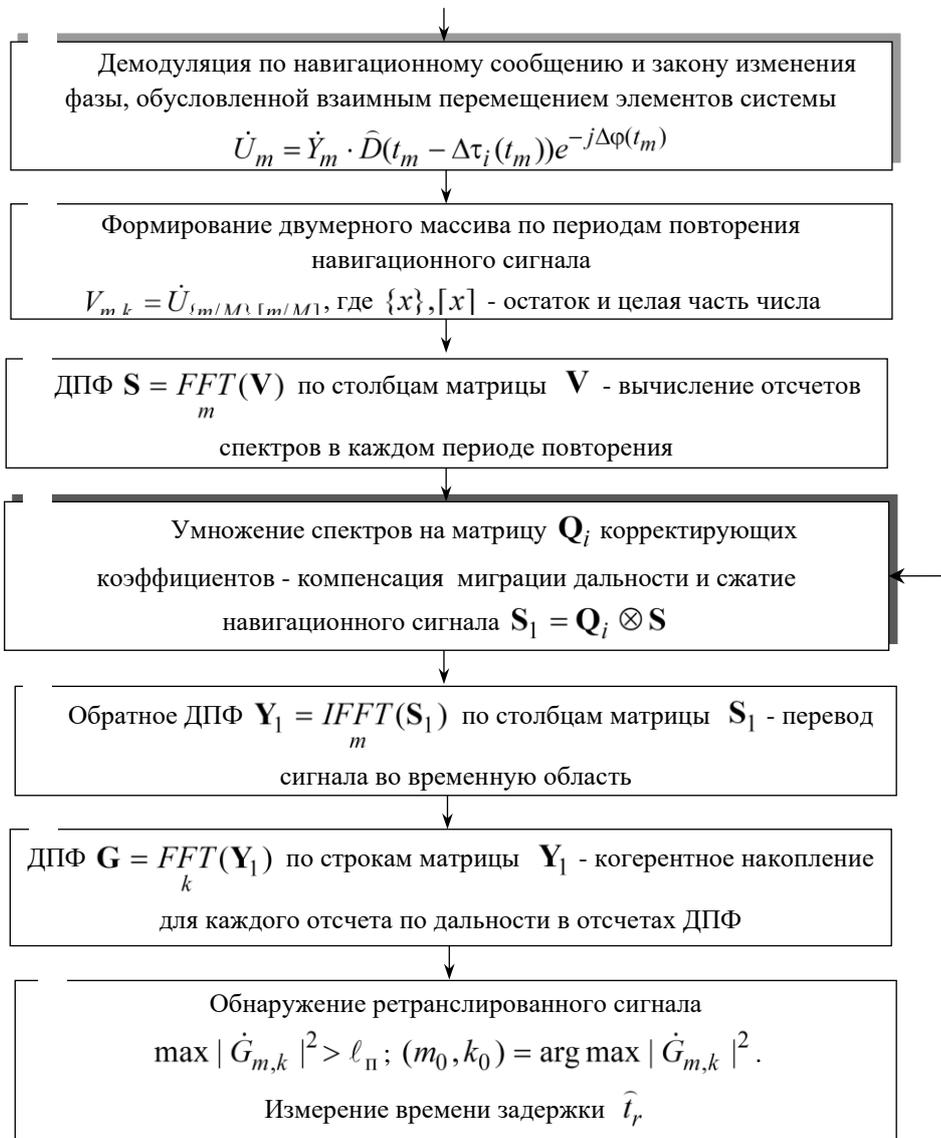


Рис. 3. Блок-схема алгоритма обработки принимаемого сигнала

Закон фазовой модуляции принимаемого сигнала можно представить в виде

$$\Delta\varphi(t) = \frac{2\pi}{\lambda_1} \left(V_{0r1}t + \frac{1}{2} a_{r1}t^2 + \frac{1}{6} a'_{r1}t^3 \right) + \frac{2\pi}{\lambda_p} \left(V_{0r2}t + \frac{1}{2} a_{r2}t^2 + \frac{1}{6} a'_{r2}t^3 \right), \quad (2)$$

где λ_1, λ_p - длины волн навигационного и ретранслируемого сигнала.

По указанным параметрам обработка многоканальная (блоки алгоритма с возможной многоканальностью выделены тенью) в диапазоне априорной неопределенности радиальных ускорений и их производных $a_{r1(2)}, a'_{r1(2)}$ с шагом $\approx \Delta a / 2; \approx \Delta a' / 2$ с выбором канала обработки, в котором достигается максимум квадрата модуля результата обработки. После устранения закономерной фазовой модуляции принимаемого сигнала, обусловленной взаимным пространственным перемещением элементов системы, и фазовой манипуляции навигационным сообщением сигнал разделяется (блок 2, где $M = T_0 F_s$ - число отсчетов на периоде повторения) на периоды повторения и вычисляются спектры для каждого периода повторения (блок 3). Полученная матрица внутрипериодных спектров умножается (блок 4) на матрицу \mathbf{Q}_i спектральных коэффициентов, образованную перемножением отсчетов комплексной частотной характеристики согласованного фильтра навигационного сигнала и корректирующих фазовых коэффициентов, определяемых на основе свойства взаимосвязи смещения по времени и фазовой структуры спектра [5], и выполняется (блок 5) обратное ДПФ для каждого периода повторения. Междупериодное когерентное накопление сигнала осуществляется в отсчетах ДПФ по периодам повторения (блок 6), после чего выполняется обнаружение сигнала и измерение времени задержки (блок 7). Аналогичные по идее алгоритмы обработки, но без компенсации миграции дальности и при ограниченной компенсации миграции частоты приведены в [11].

После измерения времен задержки \hat{t}_r по всем комбинациям «частота навигационного сигнала/частота ретрансляции» по расчетным соотношениям [1] вычисляются ПЭС на трассах НС-СР и СР-ПП.

Список использованных источников

1. Каплярчук Е.А. Оценивание полного электронного содержания в ионосфере с использованием наноспутника на основе перекрестной ретрансляции сигналов GPS на выделенные частоты 150/400 МГц / Е.А. Каплярчук, С.В. Козлов, А.М. Крот // в наст. сборнике.
2. Каплярчук Е.А. Обоснование технических решений бортовой аппаратуры ретрансляции наноспутника при оценивании полного электронного содержания в ионосфере на основе перекрестной ретрансляции навигационных сигналов GPS / Е.А. Каплярчук, С.В. Козлов // в наст. сборнике.
3. Груздов, В.В. Новые технологии дистанционного зондирования Земли из космоса. – М.: Техносфера, 2018. – 482 с.
4. Купряшкин И.Ф. Малогабаритные многофункциональные РЛС с непрерывным частотно-модулированным излучением. Монография. – М.: Радиотехника, 2020. – 280 с.
5. Алгоритмы длительного когерентного накопления отраженного сигнала при ненулевых высших производных дальности до радиолокационной цели в спектральной области / Козлов С.В., Ле В.К. // Доклады БГУИР, № 5, 2021. – С.35-44.
6. Саврасов, Ю. С. Алгоритмы и программы в радиолокации / Ю. С. Саврасов. Радио и связь, 1985. – 216 с.
7. ГЛОНАСС. Принципы построения и функционирования / Под ред. А.И. Перова, В.Н. Харисова. Изд. 4-е перераб. и доп. – М.: ИПРЖР, 2010. – 800 с.
8. Движение наноспутника относительно центра масс на околоземных орбитах: учебное пособие / И.В. Белоконов, И.А. Тимбай. – Самара: Издательство Самарского университета, 2020. – 128 с.
9. Современные ГНСС | Прикладной потребительский центр ГЛОНАСС [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.glonass-iac.ru>. Дата доступа: 18.10.2022.
10. Эфемериды бортовые и точные / Orient Systems – Российский производитель ГНСС оборудования. [Электронный ресурс]. – Режим доступа <https://orsyst.ru/blog10>. Дата доступа 18.10.22.
11. Нгуен Ван Куан. Радиолокационный мониторинг судоходства с использованием сигналов подсвета от средств космического базирования. Дисс. канд. техн. наук. – Санкт-Петербург: ЛЭТИ, 2022. – 135 с. Режим доступа: etu.ru/assets/files/nauka/dissertacii/2022/nguen-van-kuan/avtoreferat-nguen-vankuan.pdf?ysclid=la7s6vpg6c733683656. Дата доступа: 08.11.22.