

МОДЕЛИРОВАНИЕ И АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПОПУТНОГО ОЦЕНИВАНИЯ
ОРБИТАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ НАНОСПУТНИКА ПРИ ИЗМЕРЕНИИ
ПОЛНОГО ЭЛЕКТРОННОГО СОДЕРЖАНИЯ В ИОНОСФЕРЕ НА ОСНОВЕ
РЕТРАНСЛЯЦИИ НАВИГАЦИОННЫХ СИГНАЛОВ ГНСС GPS

Е. А. КАПЛЯРЧУК¹, С. В. КОЗЛОВ¹, А. С. ШАПКИН²

¹ Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,
(г. Минск, Беларусь)

² Объединенный институт проблем информатики НАН Беларуси,
(г. Минск, Беларусь)

E-mail: ek.genia13@gmail.com

Аннотация. Приведены особенности моделирования измерения орбитальных параметров наноспутника-ретранслятора при попутном измерении полного электронного содержания (ПЭС) в ионосфере при ретрансляции сигналов GPS. Обоснованы значения времени когерентного накопления при невозмущенной и возмущенной ионосфере. Приведены значения точности оценки орбитальных параметров.

Abstract. The paper presents the features of modeling the measurement of orbital parameters of a nanosatellite-repeater during the simultaneous measurement of the total electron content (TEC) in the ionosphere during the retransmission of GPS signals. The values of the coherent accumulation time for an undisturbed and disturbed ionosphere are substantiated. The parameters of the accuracy of the orbital parameters estimation are presented.

Введение

В [1] приведен алгоритм «попутного» оценивания орбитальных параметров наноспутника-ретранслятора при измерениях ПЭС на основе ретрансляции сигналов GPS [2,3].

Цель статьи – анализ особенностей реализации, моделирование и анализ эффективности оценивания орбитальных параметров в различных условиях наблюдения.

Оценка параметров когерентности принимаемого сигнала и определение времени когерентного накопления ретранслированного сигнала

Основой как измерений ПЭС [2], так и оценивания орбитальных параметров [1] являются результаты когерентного накопления принимаемого ретранслированного сигнала GPS на частотах 150 МГц и 400 МГц. С учетом высокой стабильности параметров сигналов GPS и при отсутствии выраженных ионосферных эффектов время когерентного накопления сигналов GPS может составлять единицы секунд [4].

При распространении сигналов в ионосфере без мелкомасштабных неоднородностей (ММН) электронной концентрации («гладкая» ионосфера) сигнал будет происходить только изменение групповой и фазовой скорости распространения электромагнитной волны что не повлияет на возможное время когерентного накопления ретранслированного сигнала.

При наличии мелкомасштабных неоднородностей (ММН) электронной концентрации в ионосфере с характерным размером $l_s = 10 \dots 1000$ м будет происходить рассеяние (дифракция) электромагнитных волн с длинами $\lambda_{p1} = 2$ м и $\lambda_{p2} = 0,75$ м на этих неоднородностях [5,6]. Оценим основные параметры, определяющие степень когерентности ретранслированного сигнала в результате указанной дифракции.

СКО флуктуаций фазового фронта электромагнитной волны при наличии ММН с СКО $\sigma_{\Delta n}$ определяется выражением

$$\sigma_{\varphi 1(2)} = \frac{80,8\pi\sigma_{\Delta n}\lambda_{p1(2)}}{c^2}. \quad (1)$$

Мощность принимаемого сигнала можно представить в виде

$$\overline{P_r} = P_r + P_{\text{фл}}, \quad (2)$$

где P_r , $P_{\text{фл}}$ - регулярная и флуктуационная составляющая мощности.

Параметр райсовских замираний

$$\gamma^2 = \frac{P_r}{P_{\text{фл}}}. \quad (3)$$

Указанный параметр можно вычислить через СКО флуктуаций фазового фронта

$$\gamma^2 = \frac{e^{-\sigma_{\phi 1(2)}^2}}{1 - e^{-\sigma_{\phi 1(2)}^2}}. \quad (4)$$

Из (2)-(5) следует, что регулярная составляющая

$$P_r = \frac{\gamma^2}{1 + \gamma^2} \overline{P_r} = \gamma_r \overline{P_r}, \quad (5)$$

где $\gamma_{r1(2)} = \frac{\gamma^2}{1 + \gamma^2} = e^{-\sigma_{\phi 1(2)}^2}$ - относительная доля регулярной составляющей.

Зависимости параметра райсовских замираний от СКО мелкомасштабных неоднородностей электронной концентрации $\sigma_{\Delta n}$ приведена на рисунке 1.

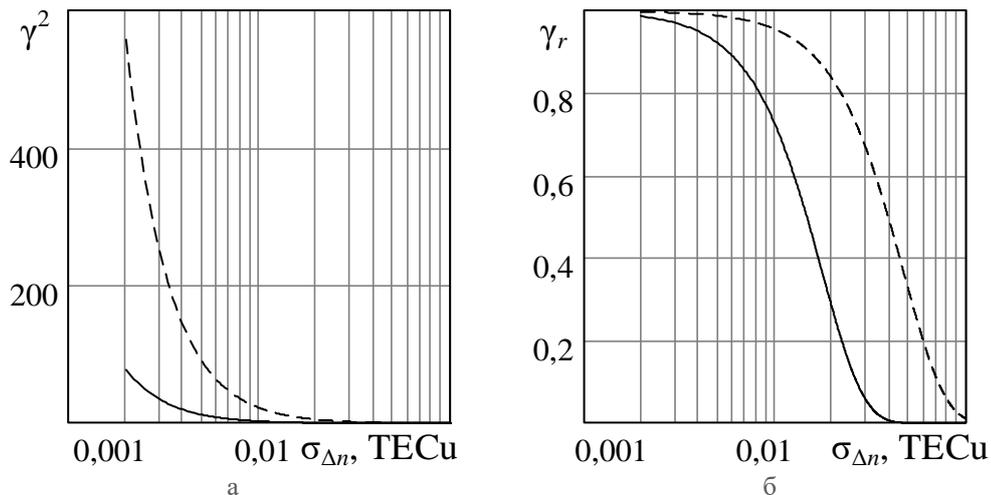


Рис. 1. Зависимости параметра замираний и относительной доли регулярной составляющей от СКО мелкомасштабных неоднородностей для длин волн 2 м (сплошная кривая) и 0,75 м (пунктирная кривая): а – параметр замираний; б – относительная доля регулярной составляющей

СКО мелкомасштабных неоднородностей ЭК для слабо возмущенной ионосферы обычно составляет величину $\sigma_{\Delta n} < 0,01$ TECu (1 TECu соответствует полному электронному содержанию 10^{16} $1/m^2$), для умеренно возмущенной ионосферы может составлять $\sigma_{\Delta n} = 0,02 \dots 0,05$ TECu, а для сильно возмущенной ионосферы – доли...единицы TECu.

Анализ приведенных на рисунке 1 зависимостей позволяет сделать следующие выводы:

для слабозвозмущенной ионосферы доля регулярной составляющей будет порядка 0,75 для длины волны 2 м и более 0,95 для длины волны 0,75 м; это определяет возможность когерентного накопления ретранслированного сигнала в течении единиц секунд при энергетических потерях порядка минус 1,25 дБ и минус 0,2 дБ для длин волн 2 м и 0,75 м, соответственно;

для умеренно возмущенной ионосферы доля мощности регулярной составляющей для длины волны 2 м уменьшается для близких к нулю значений, а для длины волны 0,75 м составит 0,67...0,33; поэтому время когерентного накопления отраженного сигнала нужно уменьшать до величины времени корреляции его флуктуаций; аналогичный вывод можно сделать и для сильно возмущенной ионосферы.

Определим время корреляции флуктуаций ретранслированного сигнала. Существенным для дифракции радиоволн является первая зона Френеля с радиусом

$$R_{F1(2)} = \sqrt{\lambda_{p1(2)} \frac{h_{\max}}{\sin \varepsilon}}, \quad (6)$$

где h_{\max} – высота слоя с максимумом электронной концентрации; ε – угол места НР при наблюдении с ПП. Для $\varepsilon = 15^\circ \dots 90^\circ$ и $h_{\max} = 300$ км получим характерные значения $R_{F1} = 1500 \dots 775$ м и $R_{F2} = 932 \dots 475$ м.

При высоте H орбиты НР дальность до него составит (рисунок 2)

$$r_2 = \frac{R_e + H}{\cos \varepsilon} \sin \left(\frac{\pi}{2} - \varepsilon - \arcsin \left(\frac{R_e}{R_e + H} \cos \varepsilon \right) \right), \quad (7)$$

где R_e – радиус Земли, а его орбитальная скорость будет определяться гравитационным потенциалом GM Земли как

$$V = \sqrt{\frac{GM}{R_e + H}}. \quad (8)$$

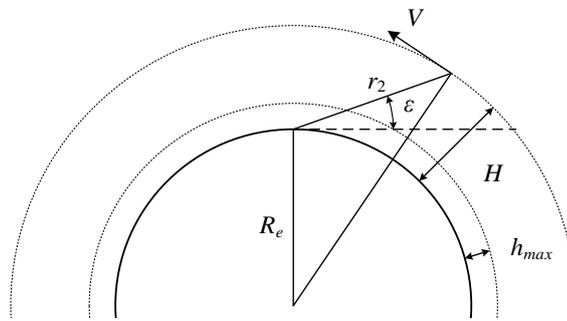


Рис. 2. Геометрия наблюдения

Угловая скорость спутника относительно ПП составит

$$\omega = \frac{V_{\tau}}{r_2} = \frac{V}{r_2} \cos \left(\arcsin \left(\frac{R_e}{R_e + H} \cos \varepsilon \right) \right). \quad (8)$$

Следовательно, линейная скорость перемещения линии ПП-НР в районе первой зоны Френеля

$$V_{\text{л}} = \omega \frac{h_{\max}}{\sin \varepsilon}. \quad (9)$$

При указанном линейном перемещении будет происходить изменение состава мелкомасштабные неоднородностей (рисунок 3) – часть неоднородностей будет выходить из первой Зоны Френеля, часть оставаться и, кроме того, будут добавляться новые неоднородности.

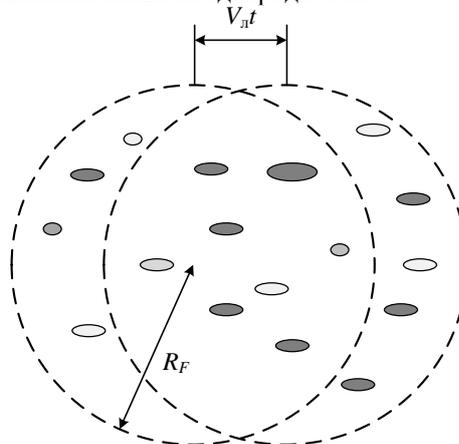


Рис. 3. Иллюстрация обновления состава мелкомасштабных неоднородностей

Относительная доля ММН, оставшихся в пределах первой зоны Френеля определяется из геометрических соображений как

$$\chi = \frac{2}{\pi} \left(\beta - \frac{1}{2} \sin(2\beta) \right), \quad (10)$$

где $\beta = \arcsin \frac{\sqrt{4 - \left(\frac{V_{\text{л}} t}{R_F}\right)^2}}{2}$ – половина центрального угла, ограничивающего круговой сегмент, образованный пересечением окружностей на рисунке 3.

В предположении, что вклад всех ММН примерно одинаков, и интерпретируя χ как коэффициент корреляции, нормированная корреляционная функция флуктуаций ретранслированного сигнала от времени наблюдения может быть определена аналогичной (10) зависимостью вида

$$r(t) = \frac{2}{\pi} \left(\arcsin \sqrt{1 - \frac{1}{4} \left(\frac{V_{\text{л}} t}{R_F}\right)^2} - \frac{1}{2} \sin \left(2 \arcsin \sqrt{1 - \frac{1}{4} \left(\frac{V_{\text{л}} t}{R_F}\right)^2} \right) \right). \quad (11)$$

График указанной зависимости приведен на рисунке 4.

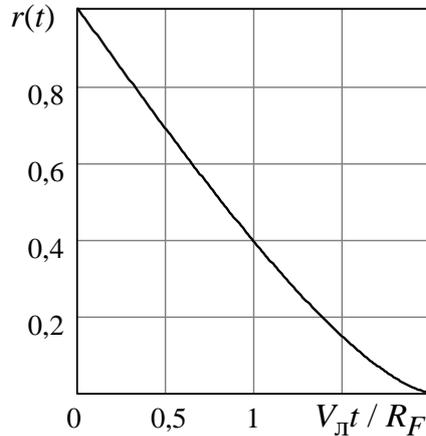


Рис. 4. Зависимость коэффициента корреляции ММН от нормированного к радиусу первой зоны Френеля перемещения линии ПП-НР

Время корреляции флуктуаций ретранслированного сигнала по определению [7] составит

$$\tau_{c1(2)} = \frac{0,849 R_{F1(2)}}{V_{\text{л}}}. \quad (12)$$

Пусть время наблюдения ретранслированного навигационного сигнала составляет $T_{\text{н}}$. Ширина зубца энергетического спектра ретранслированного сигнала составит

$$\Delta F_{LC1(2)} = \frac{1}{T_{\text{н}}} + \frac{1}{2\tau_{c1(2)}}. \quad (13)$$

Согласно [6], оптимальное время когерентного накопления

$$T_{\text{кн}1(2)} = \frac{1}{\Delta F_{LC1(2)}} \sqrt{\frac{1 + \mu \frac{\Delta F_{LC1(2)}}{F_r}}{1 + \mu \frac{F_r}{\Delta F_{LC1(2)}}}}, \quad (14)$$

где μ – отношение сигнал/шум на выходе устройства внутрипериодной обработки; $F_r = 1000$ Гц – частота повторения навигационного сигнала. Результаты расчетов $T_{\text{кн}1(2)}$ приведены таблице 1.

Таблица 1. Оптимальное время когерентного накопления для высоты орбиты наноспутника-ретранслятора 1000 км и $\mu = 1$ для умеренно и сильно возмущенной ионосферы

Угол места, град.	Умеренно-возмущенная ионосфера	Сильно-возмущенная ионосфера
	$T_{кн1}$, мс	$T_{кн2}$
15	24	21
30	23	20
45	21	18
60	20	17
75	20	17
90	19	16

Отметим, что сам по себе переход к комбинированному (когерентному и некогерентному) накоплению не влечет за собой снижения точности измерения разности времен задержки. Как известно, когерентный и некогерентный измерители при регулярных измерениях имеют одинаковую точность []. Смысл когерентного накопления состоит в увеличении отношения сигнал/шум до такого уровня, при котором практически исключаются аномальные ошибки измерений.

Анализ приведенных в таблице 1 результатов позволяет сделать вывод, что при умеренно и сильно возмущенной атмосфере оптимальным является когерентное накопление ретранслированного сигнала на интервале времени 20 мс, что совпадает с длительностью одного символа навигационного сообщения, с последующим некогерентным накоплением на заданном времени единичного наблюдения. Для «гладкой» невозмущенной атмосферы может быть реализовано когерентное накопление на всем интервале длительности единичного наблюдения.

Состав и структура математической модели

Для исследования эффективности определения орбитальных параметров по алгоритму [1] были выполнены доработки математической модели - цифрового двойника (ЦД) системы низкоорбитального контроля ионосферы (НКИ).

ЦД системы НКИ воспроизводит перемещение заданного числа НР и НС по орбитам, перемещение приемных пунктов ССТП при вращении Земли, определение взаимного пространственного положения и видимости НС, НР и ПП, а также имитирует распределение электронной концентрации в ионосфере и результаты оценивания ПЭС на трассах НР-ПП за заданное время наблюдения.

Доработанный вариант ЦД дополнительно воспроизводит следующие процессы:

измерения суммарных дальностей «НС-НР-ПП» в соответствии с вычисляемыми значениями отношения сигнал/шум в приемной аппаратуре наземного приемного пункта по ретранслированному сигналу;

разовые измерения декартовых координат НР;

трехэтапное оценивание орбитальных параметров по совокупности измерений разовых координат;

получение статистических параметров оценивания орбитальных параметров по множеству реализаций.

Результаты моделирования и их обсуждение

Типовая ситуация наблюдения при пролете НР в пределах прямой видимости с ПП, расположенных на территории РБ, показана на рис. 5. Время видимости НР хотя бы одним ПП составляет 700 с, центральный угол наблюдаемого участка орбиты – около 40°.

Положение НР показано прямоугольником белого цвета, если НР находится вне зоны видимости и черного цвета, если он в зоне видимости. Положение ПП ССТП показано желтыми точками, а положение одного из НС GPS в начальный момент времени показано круглыми маркерами. Вертикальная диаграмма иллюстрирует кодировку вертикально ПЭС в градациях яркости.

Оценки проводились для случая наличия единственного ПП при длительности единичных измерений 1 с, времени когерентного накопления 20 мс и интервале времени между единичными измерениями декартовых координат 10 с при наблюдении 1/8 и 1/64 части орбиты.

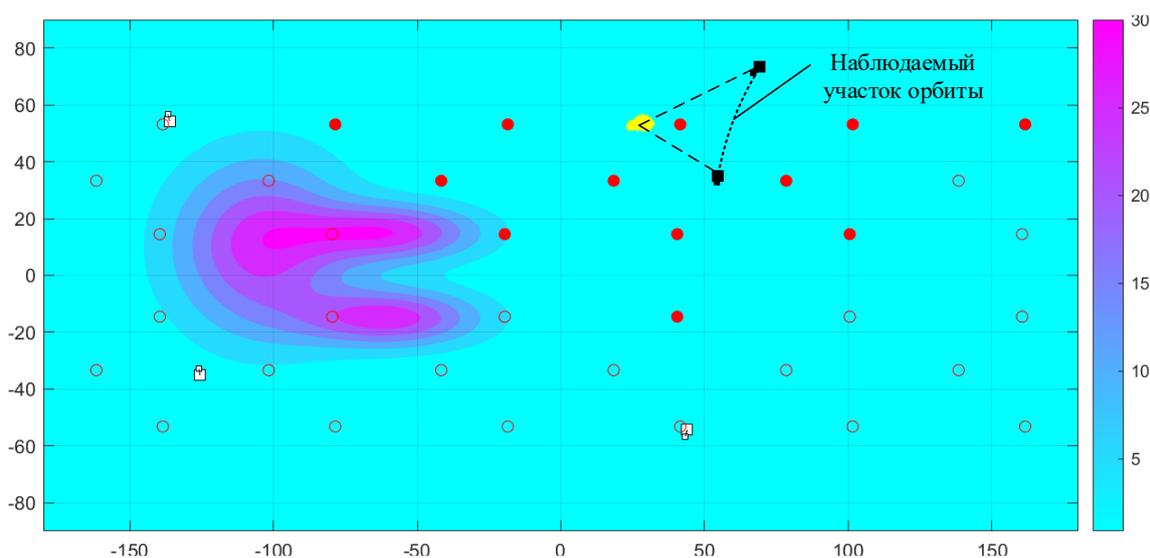


Рис. 5. Пространственная ситуация при моделировании

Для типовых параметров аппаратуры и достигаемых отношениях сигнал/шум считалось, что определяющий вклад в среднеквадратическую ошибку измерения дальности вносят погрешности навигационно-временного обеспечения, эфемерид, расхождения шкал времени, фактор многолучевого распространения принимаемого сигнала и т.д. [9]. Результирующая СКО измерения дальности принималась равной 25 м, что существенно больше, чем флуктуационная ошибка измерения дальности при достижимом отношении сигнал/шум. Результаты расчета статистических параметров оценивания ОП для случая наблюдения части орбиты в 1/8 и 1/64 от витка приведены в таблице 2.

Таблица 2. Средние квадратические ошибки оценивания орбитальных параметров

Наименование параметра	Средняя квадратическая ошибка оценивания параметра при доле наблюдаемой части орбиты	
	1/8	1/64
Угол наклона плоскости орбиты σ_γ , град.	$3,4 \cdot 10^{-5}$	$2,1 \cdot 10^{-4}$
Долгота восходящего узла σ_Ω , град.	$4,6 \cdot 10^{-5}$	$7,9 \cdot 10^{-4}$
Большая полуось эллипса σ_a , м	4,1	85
Эксцентриситет σ_e	$2,8 \cdot 10^{-6}$	$4,4 \cdot 10^{-5}$
Аргумент перигея σ_ω , град.	$4,3 \cdot 10^{-5}$	$3,3 \cdot 10^{-5}$
Время прохождения перигея σ_{t_0} , с	0,017	0,167
Составляющие скорости по осям $\sigma_{V_x}, \sigma_{V_y}, \sigma_{V_z}$, м/с	0,085 / 0,078 / 0,017	0,18 / 0,14 / 0,35

Как следует из приведенных в табл. 1 результатов, достигаемая точность оценивания орбитальных параметров высокая. При наличии одного ПП при прогнозировании координат НР на сутки при использовании всей доступной для наблюдения части орбиты (примерно 1/8 часть витка) математическое ожидание расстояния между истинным и прогнозируемым положением НР не превышает 1 км, что полностью соответствует потребностям практики. Уменьшение наблюдаемой части орбиты до 1/64 части витка приводит к закономерному ухудшению точности оценивания, причем точность оценивания первых двух из шести параметров (угла наклона плоскости орбиты и долготы восходящего узла) ухудшается примерно пропорционально уменьшению времени наблюдения. Точность оценивания других параметров, за исключением аргумента перигея, ухудшается быстрее. При увеличении числа ПП, а также уменьшении периода измерений декартовых координат СКО оценивания ОП уменьшаются пропорционально корню квадратному из коэффициента увеличения числа независимых измерений.

Список использованных источников

1. Каплярчук, Е.А. Алгоритм попутного оценивания орбитальных параметров наноспутника при измерении полного электронного содержания в ионосфере на основе ретрансляции сигналов GPS / Е. А. Каплярчук, А.С. Шапкин // в наст. сборнике.
2. Способ оценивания полного электронного содержания в ионосфере на основе ретрансляции сигналов глобальной навигационной спутниковой системы GPS / И. В. Белоконов [и др.] // Информатика. – 2023. – Т. 20, № 2. – С. 7–27. <https://doi.org/10.37661/1816-0301-2023-20-2-7-27>.
3. Обработка ретранслированных навигационных сигналов глобальной навигационной спутниковой системы GPS в задаче оценивания полного электронного содержания в ионосфере / Е. А. Каплярчук [и др.] // Информатика. – 2023. – Т. 20, № 3. – С. 21–36. <https://doi.org/10.37661/1816-0301-2023-20-3-21-36>.
4. Нгуен Ван Куан. Радиолокационный мониторинг судоходства с использованием сигналов подсвета от средств космического базирования. Дисс. канд. техн. наук. – ЛЭТИ, 2022. – 135 с.
5. Пашинцев, В. П. Методика селекции мелкомасштабных ионосферных возмущений в рядах вариаций полного электронного содержания / В. П. Пашинцев, А. С. Султанов, М. В. Песков, К. И. Топорков // Вестник Северо-Кавказского федерального университета, 2015, № 3. – С. 28-34.
6. Чипига, А.Ф. Оценка интенсивности ионосферных мерцаний и помехоустойчивости систем спутниковой связи по результатам измерения полного электронного содержания / А. Ф. Чипига, В. П. Пашинцев, М. В. Песков // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – 2018. – Т. 21. – № 4-1. – С. 22-25.
7. Охрименко А.Е. Основы радиолокации и радиоэлектронная борьба. Ч.1. Основы радиолокации / А.Е. Охрименко – М.: Военное издательство, 1983. –456 с.
8. Ширман, Я.Д. Теория и техника обработки радиолокационной информации на фоне помех / Я. Д. Ширман, В. Н. Манжос. – М.: Радио и связь, 1981. – 416 с.
9. ГЛОНАСС. Принципы построения и функционирования / Под ред. А.И. Перова, В.Н. Харисова.– 4-е изд., перераб. и доп. – М. : ИПРЖР, 2010. – 800 с.