

УДК 629.05:621.396.94

## **ОБОСНОВАНИЕ ТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ БОРТОВОЙ АППАРАТУРЫ РЕТРАНСЛЯЦИИ НАНОСПУТНИКА ПРИ ОЦЕНИВАНИИ ПОЛНОГО ЭЛЕКТРОННОГО СОДЕРЖАНИЯ В ИОНОСФЕРЕ НА ОСНОВЕ ПЕРЕКРЕСТНОЙ РЕТРАНСЛЯЦИИ СИГНАЛОВ ГЛОБАЛЬНОЙ НАВИГАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ GPS**

КАПЛЯРЧУК Е. А., КОЗЛОВ С. В.

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

**Аннотация.** Приведено обоснование технических решений по построению аппаратуры ретрансляции навигационных сигналов GPS с наноспутника на выделенные для геофизических исследований частоты 150/400 МГц в интересах оценивания полного электронного содержания (ПЭС) на трассах «навигационный спутник-наноспутник» и «наноспутник-наземный приемный пункт». Приведены зависимости среднеквадратической ошибки оценивания ПЭС от параметров ретранслятора.

**Abstract.** The substantiation of technical solutions for the construction of equipment for relaying GPS navigation signals from a nanosatellite to the frequencies of 150/400 MHz allocated for geophysical research in the interests of estimating the total electron content (TEC) on the routes "navigation satellite-nanosatellite" and "nanosatellite-ground receiving point" is given. The dependences of the mean square error of TEC estimation on the repeater parameters are given.

### **Постановка задачи**

В [1] предложен способ оценки полного электронного содержания (ПЭС) в ионосфере на трассах «навигационный спутник GPS – наноспутник-ретранслятор» и «наноспутник-ретранслятор» на основе перекрестной ретрансляции навигационных сигналов. Реализация бортовой аппаратуры ретрансляции для наноспутника представляет сложную задачу. Это обусловлено жесткими ограничениями на выходную мощность ретранслятора и его энергопотребление.

Цель статьи – обоснование технических решений по построению ретранслятора навигационных сигналов и определение взаимосвязи между параметрами ретранслятора и точностью оценивания полного электронного содержания в ионосфере.

### **Структура аппаратуры ретрансляции**

Предлагаемая функциональная схема бортовой аппаратуры ретрансляции наноспутника приведена на рисунке 1.

С выхода микрополосковой навигационной приемной антенны  $A_{in}$  на частотный диапазон 1,2...1,6 ГГц принятые навигационные сигналы поступают на малошумящий усилитель (МШУ) и далее разветвляются на два полосно-пропускающих фильтра (ППФ) с центральными частотами 1575,42 МГц и 1227,6 МГц и полосами пропускания около 2 МГц. В качестве указанных фильтров могут быть использованы, например, фильтры на поверхностно-акустических волнах FP-1575B2 (на частоту 1575,42 МГц с полосой 2 МГц), FP-1227B2-2 на частоту 1575,42 МГц с полосой 2,4 МГц [2].

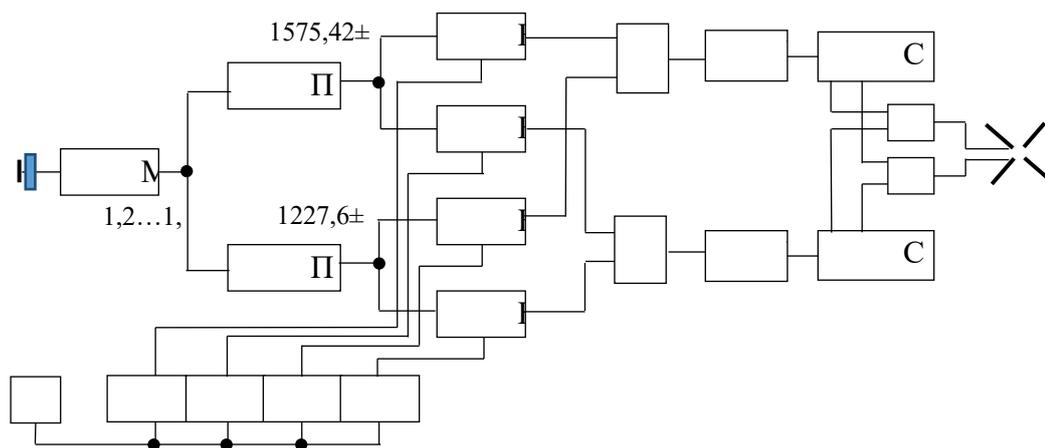


Рис. 1. Функциональная схема бортовой аппаратуры ретрансляции

Сигналы с выхода фильтров поступают на четыре балансных смесителя (БС). На вторые входы балансных смесителей поступают сигналы гетеродинов, формируемые из сигналов высокостабильного опорного генератора (ОГ) с использованием синтезаторов частоты с фиксированными целочисленными коэффициентами деления частот опорного сигнала и генератора, управляемого напряжением, с номинальными частотами с допуском  $\pm 0,5$  МГц, составляющими (1575,42–150) МГц; (1575,42–400) МГц; (1227,6–150) МГц и (1227,6–400) МГц. Сигналы выходов балансных смесителей суммируются и усиливаются в цепочке усилителей на частоты 150 МГц и 400 МГц и поступают на согласующие устройства с фазовращателями (СУ+ФВ), имеющие два выхода со сдвигом сигналов на  $\pi/2$ . Квадратурные выходные сигналы СУ+ФВ на рабочих частотах 150 и 400 МГц суммируются и поступают на элементы турникетной передающей антенны. Использование турникетной антенны с близкой к круговой поляризацией излучения в широком секторе углов обеспечивает наименьшие поляризационные потери при случайной ориентации передающей и приемной антенн [3]. Наряду с турникетной могут быть использованы антенны, специально разработанные для аппаратуры 150/400 МГц. Характеристики нескольких образцов таких антенн приведены в [4].

### Обоснование характеристик аппаратуры ретрансляции

Основными параметрами аппаратуры являются эффективный (с учетом всех потерь в тракте) коэффициент ретрансляции и мощность выходного усилителя. Определим указанные параметры с учетом предполагаемых параметров наземного приемного пункта. Примем следующие исходные данные: эквивалентная изотропная излучаемая мощность навигационного сигнала на каждой из частот по кодам C/A, L2OC  $P_{\text{нс}}=26,8$  дБВт [5,6]; дальность между НС и СР  $r_1=21000$  км; дальность между СР и ПП  $r_2=1000$  км; спектральная плотность мощности внутренних шумов аппаратуры ретрансляции и приемного тракта ПП  $N_0=5,8 \cdot 10^{-21}$  Вт/Гц ( $K_{\text{ш}}=1,5$  дБ;  $T=300$  К); средний по рабочему сектору коэффициент усиления микрополосковой приемной антенны аппаратуры ретрансляции с учетом потерь в тракте до малошумящего усилителя  $G_r=1,5$ ; коэффициент усиления передающей антенны аппаратуры ретрансляции  $G_{tr}=1$ ; коэффициент усиления антенны ПП  $G_{\text{пп}}=7,3$  дБ (трехэлементная антенн Удо-Яги с ориентацией на спутник); коэффициент потерь полезного сигнала в приемном тракте ПП  $k_{\text{пп}}=0,5$ ; коэффициент поляризационных потерь  $k_{\pi}=0,5$ .

Отношение сигнал/шум (ОСШ) на выходе согласованного фильтра для одного периода навигационного сигнала составит

$$\gamma = \frac{P_{\text{нс}} G_r G_{tr} G_{\text{пп}} \lambda_{\text{нс}}^2 \lambda_p^2 k_{\text{пп}} k_{\pi} T_0}{(4\pi)^4 r_1^2 r_2^2 N_0} K_p, \quad (1)$$

где  $\lambda_{\text{НС}} \approx 0,19$  – наименьшая длина волны для навигационного сигнала;  $\lambda_p = 0,75$  м или 2 м – длина волны ретранслированного сигнала;  $T_0 = 1$  мс – длительность навигационного сигнала для частоты  $L_1$ .

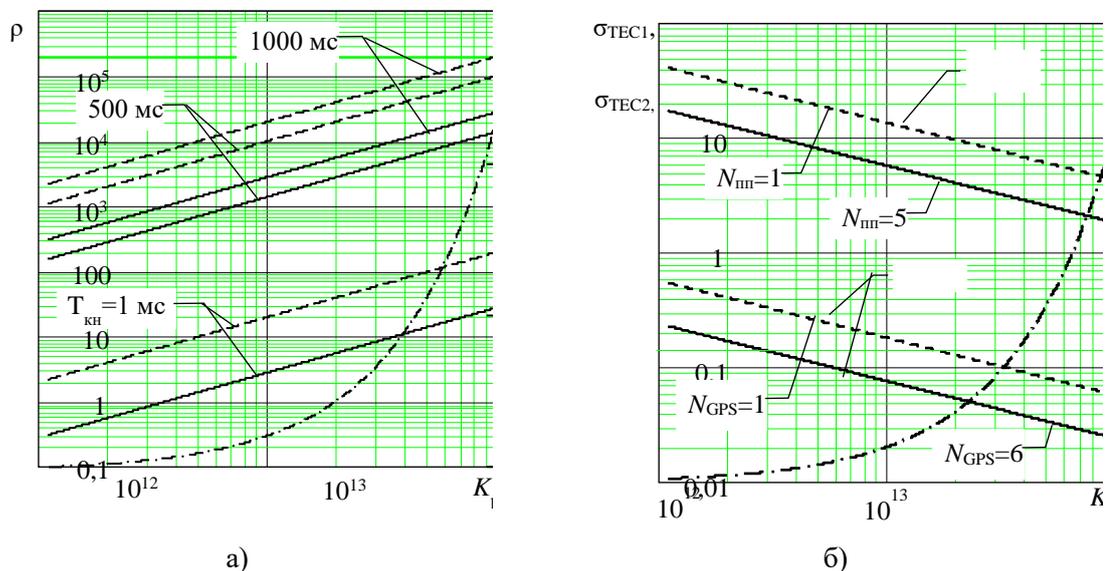
Основной особенностью рассматриваемого ретранслятора является существенное усиление собственных шумов, так как мощность принимаемого навигационного сигнала, как и для типового навигационного приемника, на 15...20 дБ [5, 6] меньше мощности шума. Поэтому коэффициент ретрансляции должен быть ограничен мощностью выходного шума, которая составит

$$P_{\text{ш}} = N_0 \Delta f_p K_p, \quad (2)$$

где  $\Delta f_p = 4$  МГц - полоса пропускания ретранслятора для случая ретрансляции на двух частотах 150 и 400 МГц. Отношение сигнал/шум при когерентном накоплении в течении времени  $T_{\text{кн}}$  составит

$$\rho(K_p) = \gamma(K_p) \frac{T_{\text{кн}}}{T_0}. \quad (3)$$

Зависимости ОСШ, мощности шума на выходе ретранслятора и СКО оценивания ПЭС-1 на трассах НС-СР ( $\sigma_{\text{ТЕС1}}$ ) и ПЭС-2 на трассах СР-ПП ( $\sigma_{\text{ТЕС2}}$ ) от  $K_p$  приведены на рисунке 2. СКО оценивания ПЭС рассчитывалась по соотношениям [1] для случая определения ПЭС на трассе наноспутник-приемный пункт при ретрансляции одной частоты  $L_1$  и видимости 1 и 6 навигационных спутников, а для случая определения ПЭС на трассе навигационный спутник-ретранслятор при ретрансляции двух частот  $L_1, L_2$  на частоту ретрансляции 150 МГц при видимости наноспутника и навигационного спутника с 1 и 5 наземных приемных пунктов. Зависимости на рисунке 2б соответствуют времени когерентного накопления 0,5 с и 1 с.



**Рис. 2.** Зависимость отношения сигнал/шум на выходе ретранслятора (а) и среднеквадратической ошибки оценивания ПЭС (б) от коэффициента ретрансляции

Из приведенных зависимостей следует, что достижение СКО оценки ПЭС на трассе наноспутник-приемный пункт порядка 0,1 ТЕСу при наличии в зоне видимости 6 спутников GPS возможно при коэффициенте ретрансляции порядка 128 дБ и мощности шума на выходе ретранслятора 0,2 Вт. Полученное значение существенно меньше, чем выходная мощность, указанная в [4,9]. Отношения сигнал/шум на выходе накопителя составит 32,3 дБ и 40,8 дБ для частот ретрансляции 400 МГц и 150 МГц, соответственно. При мощности изучения по шумам

0,2 Вт, высоте орбиты 500 км и ширине спектра шума 4 МГц спектральная плотность мощности сигнала на выходе расположенной на земле изотропной приемной антенны на согласованной поляризации будет примерно на 3 дБ ниже стандартной спектральной плотности мощности шумов стандартного приемника ( $10^{-20}$  Вт/Гц), то есть мешающее влияние излучения наноспутника-ретранслятора будет пренебрежимо малым.

Отметим также, что при оценивании ПЭС на трассе СР-ПП при ретрансляции только одного сигнала  $L_1$  на частоты 150/400 МГц принципиально возможно использование и спутников ГНСС «Глонасс». Однако с учетом используемого в ГНСС «Глонасс» частотного разделения [6] это приведет к необходимости расширения общей полосы ретрансляции до примерно 10 МГц либо последовательной работе по навигационным спутникам на разных частотах и ухудшению точности оценивания ПЭС из-за меньшего, в два раза в сравнении с GPS, коэффициента сжатия навигационного сигнала [6].

Достижение приемлемой точности оценивания ПЭС на трассе НС-СР требует больших значений коэффициента ретрансляции и, соответственно, большей выходной мощности ретранслятора. Так, при ограничении выходной мощности ретранслятора величиной 1 Вт требуемый коэффициент ретрансляции составит 137 дБ при СКО оценки ПЭС для одного и пяти приемных пунктов в зоне видимости по единичным измерениям порядка 8 и 3 ТЕСи, соответственно. С учетом относительно невысокой угловой скорости наноспутника относительно навигационного спутника возможно последующее усреднение по 10-20 независимым оценкам ПЭС-1 методом скользящего среднего.

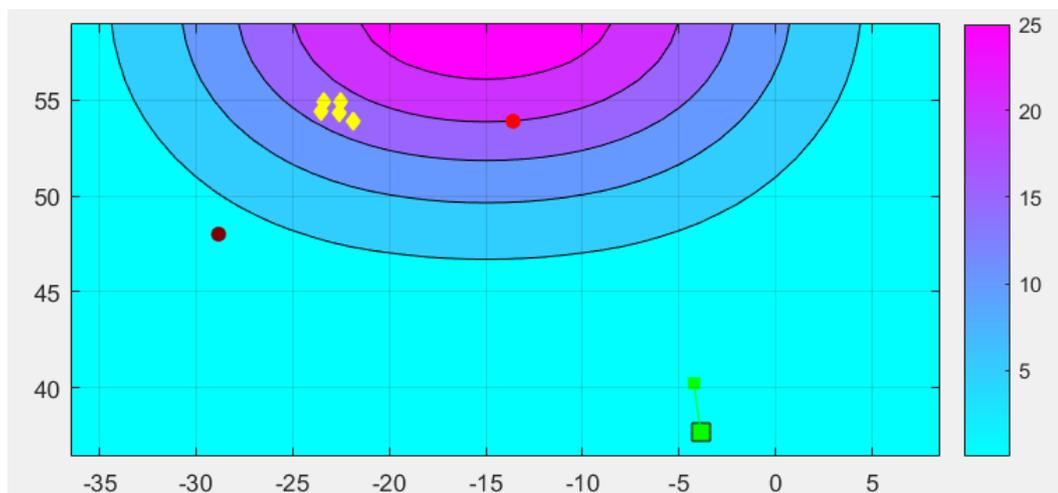
Точность измерения ПЭС на трассах СР-ПП является вполне достаточной для реализации томографических методов. Резервы повышения точности измерения ПЭС на трассах НС-СР наряду с усреднением по времени наблюдения заключаются в увеличении числа пространственно-распределенных приемных пунктов или увеличении коэффициента усиления приемных антенн аппаратуры приемных пунктов за счет использования антенных решеток.

### **Результаты моделирования**

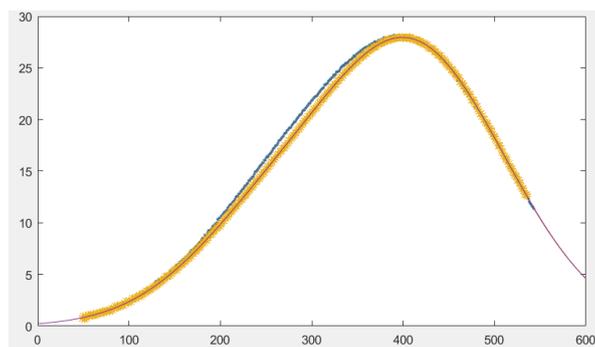
Моделирование предложенного в [1] способа оценивания ПЭС для описанного в настоящей статье облика и параметров аппаратуры ретрансляции и аппаратуры приемных пунктов проводилось путем имитации неравномерной электронной концентрации в ионосфере, моделирования орбитальных параметров навигационных спутников, наноспутника-ретранслятора, расчета истинных значений ПЭС и энергетических соотношений и воспроизведения результатов измерений ПЭС с их последующим сглаживанием.

Рассматриваемая ситуация приведена на рисунке 3. Наноспутник (квадрат со стрелочкой) находится в зоне прямой видимости пяти приемных пунктов (ромбы на рисунке) на временном интервале видимости около 500 секунд и пролетает район локального максимума электронной концентрации в ионосфере. Два из множества видимых спутников, падающих в заданный масштаб изображения, показаны в виде красных кружков. Электронная концентрация отображается в значениях вертикального ПЭС [7] в виде цветовой шкалы в ТЕСи. Горизонтальная и вертикальная оси на рисунке 3а соответствуют географическим долготе и широте. Высота максимума электронной концентрации составляют 500 км и совпадает с высотой орбиты наноспутника. В этих условиях примерно половина из показанных на рисунке 3а значений вертикального ПЭС будет относиться к трассам наноспутник-приемные пункты, а вторая половина – к трассам навигационные спутники-наноспутник. Значения ПЭС на указанных трассах могут в 2...3 раза превышать величину вертикального ПЭС ввиду большего пути в ионосфере.

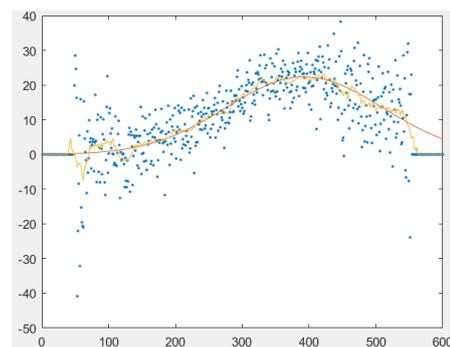
Приведенные на рисунке 3б значения истинных и измеренных ПЭС на трассе наноспутник- первый ПП (точки) и наноспутник-пятый ПП (звездочки) соответствуют коэффициенту ретрансляции 130 дБ. Истинные значения ПЭС показаны соответствующими сплошными линиями.



а) ситуация наблюдения



б) Результаты оценки ПЭС-2



в) Результаты оценки ПЭС-1

**Рис. 3.** Результаты оценивания ПЭС на трассах МКА-первый ПП, МКА- пятый ПП (а) и взаимное пространственное положение элементов системы в начале (б) и конце (в) моделирования

Значения ПЭС для первого и пятого приемного пункта незначительно различаются в соответствии с геометрией наблюдения. Истинные значения ПЭС (сплошная кривая на рисунке 3б) на трассах наноспутник-приемные пункты изменяется в пределах 1-27 ТЕСу. Измеренные ПЭС на этой трассе являются точным, максимальная ошибка единичного измерения по пяти приемным пунктам не превышает 0,1ТЕСу, что соответствует теоретическому значению при получаемом отношении сигнал/шум по ретранслированному навигационному сигналу.

На рисунке 3в для этих же исходных данных, но при большем коэффициенте ретрансляции 135 дБ, приведены результаты моделирования и измерения ПЭС на трассе между одним из навигационных спутников GPS и наноспутником. Горизонтальная ось соответствует времени наблюдения, вертикальная – значениям ПЭС в ТЕСу. Гладкая сплошная красная кривая отображает истинные значения ПЭС, точки – измеренные значения ПЭС, изрезанная сплошная кривая – результат усреднения измеренных значений ПЭС скользящим средним за 20 измерений. Аналогичный эффект увеличения энергетики принимаемого сигнала на 5 дБ может быть

достигнут и при увеличении коэффициента усиления антенны приемного пункта (применение антенной решетки или достаточно длинных антенн типа «волновой канал»). Кроме того, среднеквадратическая ошибки оценки ПЭС уменьшается обратно пропорционально числу приемных пунктов.

Как видно из результатов расчетов, ПЭС на трассе навигационный спутник-наноспутник оценивается приближенно. При больших значения истинного ПЭС на трассе оценки ПЭС достаточно близки к истинным значениям, при малых значениях ПЭС – могут иметь в значительной степени случайный характер с выходом в область отрицательных значений. Тренд скользящего среднего верный, его скорость примерно соответствует тренду истинного ПЭС. Средняя квадратическая ошибка оценивания ПЭС составляет 2...3 ТЕСи, что соответствует типовым значениям на трассах навигационный спутник-наземный двухчастотный приемник при высокоорбитальной томографии [8].

### 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. Фильтры на поверхностно-акустических волнах. Каталог. Режим доступа: <https://sawtechno.ru/catalog/filtry/filtry-na-pav>. Дата доступа 07.11.22.
3. Справочник по антенной технике: Справ. В 5 т. Т.1 / Л.Д. Бахрах, Л.С. Бенисон, Е.Г. Зелкин и др. Под ред. Я.Н. Фельда, Е.Г. Зелкина. – М.: ИПРЖР, 1997. – 256 с.
4. Гаджиев Э.В. УКВ антенны малых космических аппаратов. Дисс. канд. техн. наук. – М.: Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), 2016. – 152 с. Режим доступа: [https://mai.ru/upload/iblock/033/avtoreferat\\_gadzhiev-e.v..pdf?ysclid=la718i29fn543879484](https://mai.ru/upload/iblock/033/avtoreferat_gadzhiev-e.v..pdf?ysclid=la718i29fn543879484). Дата доступа: 07.11.22.
5. Современные ГНСС | Прикладной потребительский центр ГЛОНАСС [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.glonass-iac.ru>. Дата доступа: 18.10.2022.
6. ГЛОНАСС. Принципы построения и функционирования / Под ред. А.И. Перова, В.Н. Харисова. Изд. 4-е перераб. и доп. – М.: ИПРЖР, 2010. – 800 с.
7. Куницын В.Е. Радиотомография ионосферы / В.Е., Куницын, Е.Д. Терещенко, Е.С. Андреева – М.: Физматлит, 2007. – 336 с.
8. Смирнов В.М. Определение электронного содержания ионосферы Земли по данным дальномерных и фазовых измерений / В.М. Смирнов, В.Н. Марчук // Электронный журнал «Исследовано в России». Режим доступа: [http://zhurnal.ape.relarn.ru/articles/200\\_1465\\_1/127.pdf](http://zhurnal.ape.relarn.ru/articles/200_1465_1/127.pdf).
9. Ионозонд / Институт космических исследований Российской академии наук. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://iki.cosmos.ru/missions/ionozond>. Дата доступа 18.10.22.