

УДК 629.783-022.532:621.396.94

ОЦЕНИВАНИЕ ПОЛНОГО ЭЛЕКТРОННОГО СОДЕРЖАНИЯ В ИОНОСФЕРЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НАНОСПУТНИКА НА ОСНОВЕ ПЕРЕКРЕСТНОЙ РЕТРАНСЛЯЦИИ СИГНАЛОВ GPS НА ВЫДЕЛЕННЫЕ ЧАСТОТЫ 150/400 МГц

КАПЛЯРЧУК Е. А., КОЗЛОВ С. В., КРОТ А. М.

¹ *Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники*

² *Объединенный институт проблем информатики НАН Беларуси*

(г. Минск, Беларусь)

Аннотация. Предложен экономичный по аппаратурным затратам способ оценивания полного электронного содержания (ПЭС) в ионосфере на основе перекрестной ретрансляции сигналов L_1 , L_2 глобальной навигационной спутниковой системы (ГНСС) GPS с использованием наноспутника - ретранслятора (СР) формата CubeSat на выделенные для геофизических исследований частоты 150/400 МГц и выделения информации о ПЭС на трассах «навигационный спутник-наноспутник» и «наноспутник-наземный приемный пункт» на наземном приемном пункте из оценок времен задержек ретранслированных сигналов. Приведены расчетные соотношения для оценок ПЭС на основе анализа задержек огибающих принимаемых сигналов и дисперсий указанных оценок.

Abstract. A hardware-saving method for estimating the total electron content (TEC) in the ionosphere based on cross-retransmission of one of the L_1 , L_2 signals of the global navigation satellite system (GNSS) GPS using a nanosatellite of a satellite-relay (SR) of the CubeSat format to the frequencies allocated for geophysical research is proposed 150/400 MHz and extracting information about the TEC on the routes "navigation satellite-nanosatellite" and "nanosatellite-ground receiving point" from the retransmitted signals received at the ground receiving point. Calculation ratios for TEC estimates based on the analysis of the delays of the envelopes of the received signals are given.

Введение

Ионосфера существенно воздействует на распространение радиоволн, в частности, на сигналы ГНСС [1-3]. Основное влияние на распространение радиоволн оказывают длина волны и электронная концентрация в ионосфере, за счет которой ионосфера становится диспергирующей (дисперсионной) средой для радиоволн, в ней скорость распространения зависит от длины волны [1,2]. По этой причине происходит задержка распространения и преломление траектории радиоволн в ионосфере, а для определенных длин волн и отражение в ионосфере. Состояние ионосферы описывается множеством параметров, из которых наиболее важным параметром является электронная концентрация. В зависимости от высоты и распределения электронной концентрации ионосферу условно разделяют на слои: D (ниже 90 км), E (от 90 до 130 км), F_1 (от 130 до 200 км) и F_2 (выше 200 км). Максимальная концентрация электронов и ионов расположена в слое F_2 на высотах от 250 до 450 км.

В настоящее время имеется большой арсенал методов, средств и систем измерения электронной концентрации и ПЭС в ионосфере [2-4]. К их числу следует отнести станции вертикального и наклонного зондирования ионосферы, радиозонды, средства радиозондирования ионосферы со специализированных искусственных спутников Земли научного назначения и с использованием сигналов глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС). Основным методом определения электронной концентрации в настоящее время

является радиотомографический [1]. Он предполагает измерения значений полного электронного содержания (ПЭС) как интеграла от электронной концентрации на заданной трассе между передатчиком и приемником с последующим использованием большого объема результатов измерений для восстановления зависимости электронной концентрации от географических координат томографическими методами.

Для измерения ПЭС наиболее часто применяется высокоорбитальный метод трансферного зондирования на основе приема сигналов ГНСС двухчастотной навигационной аппаратурой потребителя, расположенной на Земле [2-4]. При прохождении через ионосферу радиосигналы, излучаемые на двух несущих частотах $f_1 \approx 1,6$ ГГц и $f_2 \approx 1,2$ ГГц с навигационного спутника (НС), испытывают различные временные задержки, а также изменения фаз [1,2,4]. Измерение этих параметров в расположенном на Земле двухчастотном приемнике ГНСС позволяет непрерывно определять значение ПЭС на трассе «НС – наземный приемник». Недостатком этого метода является его относительная «статичность», так как положение линии «навигационный спутник - наземный приемник» изменяется относительно медленно. Кроме того, высокоорбитальный метод не позволяет обнаруживать локальные неоднородности ионосферы.

Дополнительные данные для решения задач по реконструкции локальных значений ПЭС в ионосфере могут быть получены с использованием низкоорбитального метода на основе орбитальной группировки малых спутников в радиодиапазоне [2,3]. Первый вариант низкоорбитальной томографии реализуется на спутниках типа «Космос», «Транзит», «FORMOSAT-3/COSMIC», излучающих когерентные сигналы на частотах выделенных для геофизических исследований частотах 150/400 МГц [5]. На основе этих сигналов фазоразностным методом измеряется градиент ПЭС [4]. Второй вариант предполагает размещение на спутнике двухчастотного навигационного приемника, измеряющего дальности и фазы когерентных навигационных сигналов аналогично высокоорбитальной томографии, и организацию между спутником и наземной станцией приема данных канала связи с достаточно большой пропускной способностью.

К недостаткам известных методов оценивания ПЭС при низкоорбитальной томографии следует отнести высокие технические требования к двухчастотному приемнику, размещаемому на наноспутнике (измерения при больших радиальных скоростях и ускорениях, высокие требования к радиационной стойкости используемых компонентов), фазовую неоднозначность измерений при использовании двух когерентных сигналов 150/400 МГц или необходимость использования минимум 4 когерентных сигналов с частотами 150, 400, 1067 и 2844 МГц [6], а также необходимость дополнительных каналов связи.

Это обуславливает целесообразность способа измерения ПЭС при низкоорбитальной радиотомографии ионосферы за счет ретрансляции навигационных сигналов ГНСС GPS.

Содержание способа перекрестной ретрансляции

Иллюстрация предлагаемого способа приведена на рисунке 1. Наноспутник-ретранслятор (один или несколько) выводится на низкие (180...800 км) приближенно круговые орбиты. Высота орбиты выбирается является компромиссом между сложностью бортовой аппаратуры наноспутника (включая двигатели поддержания орбиты), временем существования наноспутника и объемом измерений [7]. Наиболее выгодными с позиции объема измерений являются высоты 300...500 км при значимых для томографии измеряемых значениях ПЭС как на трассах «наноспутник-наземные приемные пункты», так и на трассах «навигационный спутники – наноспутник». Минимальное число СР составляет один (получение данных 5-6 раз в сутки). Общее число СР определяется требуемым темпом обновления данных для радиотомографии и

может составлять до нескольких десятков при нахождении в зоне видимости наземного приемного пункта (ПП) не более одного СР.

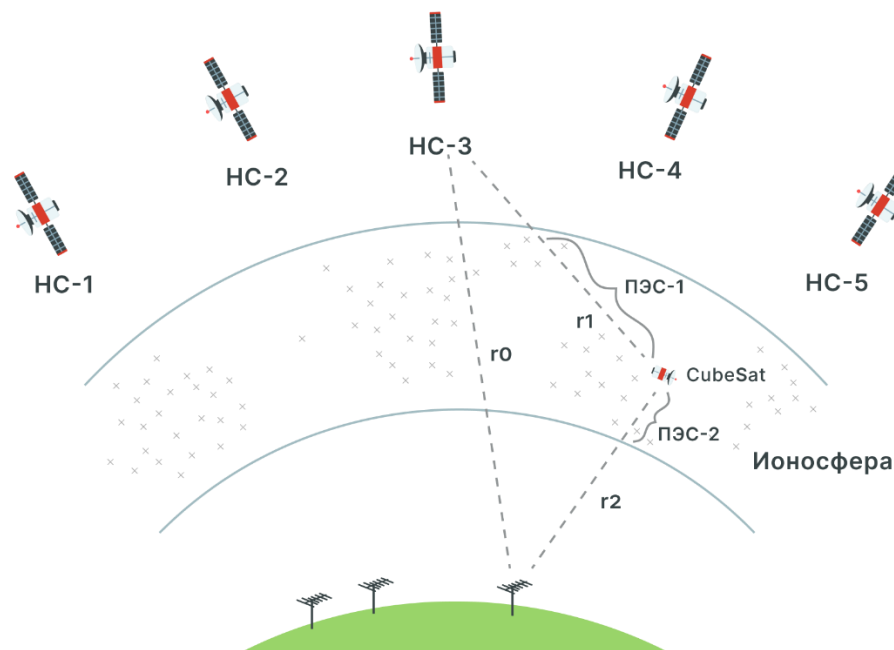


Рис. 1. Иллюстрация способа оценивания ПЭС на трассах «навигационные спутники – наноспутник» и «наноспутник-приемные пункты»

Предлагаемое техническое решение заключается в приеме и частотной фильтрации сигналов L_1 , L_2 GPS аппаратурой СР, переносе по частоте на частоты 150/400 МГц с использованием когерентных гетеродинов от общего опорного генератора, усилении, и излучении в нижнюю полусферу через слабонаправленную антенну в направлении на Землю. Прием и обработка ретранслированных сигналов при большом (до 1...3 с) времени наблюдения осуществляется аппаратурой одного или нескольких пространственно-разнесенных приемных пунктов (ПП), которые могут быть совмещены, например, со станциями системы дифференциальной коррекции.

Так как навигационные сигналы являются когерентными с известными параметрами, включая моменты излучения и координаты навигационных спутников [10], то предлагаемая совокупность технических средств образует многопозиционную радиолокационную систему (МпРЛСи) с большим (до 8-10) числом независимо функционирующих источников когерентных зондирующих сигналов (навигационные спутники), единственной радиолокационной целью – спутником-ретранслятором и одним или несколькими ПП. Данную МпРЛСи можно представить в виде совокупности бистатических радиолокационных средств, образованных каждым навигационным спутником, СР и ПП, с подвижной, ввиду взаимного пространственного перемещения НС, СР и ПП, базой.

Излучаемые навигационные сигналы содержат неизвестное навигационное сообщение [10]. Однако, оно может быть легко исключено из принимаемого сигнала за счет приема и дешифрации прямого навигационного сигнала на ПП с использованием стандартного навигационного приемника, так как прием «прямого» навигационного сигнала на ПП происходит раньше приема ретранслированного сигнала. Ввиду высокой когерентности навигационных сигналов каждого НС в это системе могут быть реализованы методы синтеза апертуры

[8,9] или, что аналогично, способы обработки при длительном когерентном накоплении принимаемого сигнала.

Отметим, что из принимаемого на ПП ретранслированного сигнала можно извлечь ту же самую информацию, что и при приеме прямого навигационного сигнала в двухчастотном приемнике: время задержки и разность фаз сигналов на двух когерентных частотах L_1 и L_2 . При это для сохранения когерентности перенос частот L_1 и L_2 необходимо проводить с использованием одного гетеродинов, работающих от одного высокостабильного генератора. Кроме того, по измерениям суммарных дальностей и доплеровских сдвигов частоты навигационных сигналов (которые не зависят от ПЭС) от множества видимых навигационных спутников возникает возможность высокоточного определения координат и параметров движения СР.

Выполним перекрестную ретрансляцию принимаемых аппаратурой СР навигационных сигналов на частотах L_1, L_2 одновременно на две частоты $f_{150}=150$ МГц и $f_{400}=400$ МГц, что обеспечит четыре ретранслированных сигнала, принимаемых на наземном ПП:

$$\begin{aligned} s_{1,1}(t): f_1 \rightarrow f_{150}; \quad s_{1,2}(t): f_1 \rightarrow f_{400}; \\ s_{2,1}(t): f_2 \rightarrow f_{150}; \quad s_{2,2}(t): f_2 \rightarrow f_{400}. \end{aligned} \quad (1)$$

Для ГНСС GPS $f_1=1575,42$ МГц, $f_2=1227,6$ МГц (сигнал L2C с BPSK модуляцией начиная с аппаратов IIR-M; в настоящее время 24 спутника из 32 в орбитальной группировке [10]), причем дальномерные коды на указанных частотах имеет одинаковую ширину спектра (1,023 МГц), но разную длину (1 мс и 20 мс), и являются квазиортогональными, что обеспечивает возможность их разделения при согласованной фильтрации на ПП.

Суммарные дальности НС-СР-ПП, измеряемые по задержкам огибающих принимаемых сигналов, составят

$$\begin{aligned} d_{1,1} = r_1 + \frac{K_{\text{ион}} \cdot \text{TEC}_1}{f_1^2} + r_2 + \frac{K_{\text{ион}} \cdot \text{TEC}_2}{f_{400}^2}; \quad d_{1,2} = r_1 + \frac{K_{\text{ион}} \cdot \text{TEC}_1}{f_1^2} + r_2 + \frac{K_{\text{ион}} \cdot \text{TEC}_2}{f_{150}^2}; \\ d_{2,1} = r_1 + \frac{K_{\text{ион}} \cdot \text{TEC}_1}{f_2^2} + r_2 + \frac{K_{\text{ион}} \cdot \text{TEC}_2}{f_{400}^2}; \quad d_{2,2} = r_1 + \frac{K_{\text{ион}} \cdot \text{TEC}_1}{f_2^2} + r_2 + \frac{K_{\text{ион}} \cdot \text{TEC}_2}{f_{150}^2}, \end{aligned} \quad (2)$$

где r_1, r_2 - дальности НС-СР и СР-ПП, соответственно; $\text{TEC}_1, \text{TEC}_2$ - истинные значения ПЭС на указанных трассах; $K_{\text{ион}}=40,308$ м³/с² – коэффициент связи между ПЭС и ионосферной задержкой.

Из (2) следует, что имея оценки $\hat{d}_{1,1}, \hat{d}_{1,2}, \hat{d}_{2,1}, \hat{d}_{2,2}$ суммарной дальности по задержке огибающей можно получить две независимые оценки ПЭС по кодовым измерениям на трассе СР-ПП:

$$\text{TEC}_2^{(1)} = \frac{\hat{d}_{1,1} - \hat{d}_{1,2}}{K_{\text{ион}} \left(\frac{1}{f_{150}^2} - \frac{1}{f_{400}^2} \right)}; \quad \text{TEC}_2^{(2)} = \frac{\hat{d}_{2,1} - \hat{d}_{2,2}}{K_{\text{ион}} \left(\frac{1}{f_{150}^2} - \frac{1}{f_{400}^2} \right)}. \quad (3)$$

При наличии N_{gps} одновременно наблюдаемых на наноспутнике и на приемном пункте навигационных спутников системы GPS с примерно одинаковыми условиями приема (отношениям сигнал/шум) оценки $\text{TEC}_{2_n}^{(1)}, \text{TEC}_{2_n}^{(2)}$, полученные по $n=1, \overline{N_{\text{gps}}}$ НС могут быть усреднены:

$$\overline{TEC}_2 = \frac{1}{2N_{\text{gps}}} \sum_{n=1}^{N_{\text{gps}}} \left(TEC_{2n}^{(1)} + TEC_{2n}^{(2)} \right). \quad (4)$$

Для оценок ПЭС на трассе НС-СР аналогично предыдущему случаю запишем

$$TEC_1^{(1)} = \frac{\hat{d}_{1,1} - \hat{d}_{2,1}}{K_{\text{ион}} \left(\frac{1}{f_1^2} - \frac{1}{f_2^2} \right)}; \quad TEC_1^{(2)} = \frac{\hat{d}_{1,2} - \hat{d}_{2,2}}{K_{\text{ион}} \left(\frac{1}{f_1^2} - \frac{1}{f_2^2} \right)}, \quad (5)$$

то есть в данном случае происходит исключение трассы «СР-ПП».

При наличии $N_{\text{пп}}$ приемных пунктов с примерно одинаковыми условиями приема (отношениям сигнал/шум) оценки $TEC_{1n}^{(1)}$, $TEC_{1n}^{(2)}$, полученные по $n = \overline{1, N_{\text{пп}}}$ приемным пунктам также могут быть усреднены:

$$\overline{TEC}_2 = \frac{1}{2N_{\text{пп}}} \sum_{n=1}^{N_{\text{пп}}} \left(TEC_{2n}^{(1)} + TEC_{2n}^{(2)} \right). \quad (6)$$

Отметим, что оценивании ПЭС на трассе СР-ПП можно ограничиться ретрансляцией на частоты 150/400 МГц только частоты L_1 , а при оценивании ПЭС на трассе НС-СР можно ограничиться ретрансляцией двух частот L_1, L_2 только на одну из частот ретрансляции 150/400 МГц. Такой вариант ретрансляции может быть использован, например, попеременно, с разделением по времени.

Отметим также, что для случая использования большого числа наноспутников-ретрансляторов и возможного нахождения в зоне действия приемного пункта двух наноспутников (наличие трех наноспутников практически исключено) разрешение ретранслируемых ими сигналов будет происходить как по времени задержки, так и по другим параметрам (доплеровскому сдвигу частоты и производной).

Анализ возможностей способа

При использовании перекрестной ретрансляции примечательным является два обстоятельства:

за счет ретрансляции в нижний диапазон частот резко увеличивается чувствительность метода определения ПЭС по задержке принимаемых сигналов, так как величина ПЭС в $1 \text{ TECu} = 10^{16} \text{ 1/м}^2$ будет соответствовать разности суммарных дальностей $\hat{d}_{1,1} - \hat{d}_{1,2} = \hat{d}_{2,1} - \hat{d}_{2,2} = 15,4 \text{ м}$; в то же время, при использовании классического метода на основе приема навигационных сигналов, при ПЭС в 1 TECu разность дальностей будет соответствовать всего $0,1 \text{ м}$, что весьма сложно для измерения;

за счет ретрансляции одного и того же навигационного сигнала на две разные частоты и последующего вычитания в (3) оценок суммарной дальности в результирующем выражении взаимно уничтожаются как геометрические пути между элементами системы, так и значение ПЭС на трассе НС-СР; кроме того, исключаются ошибки часов НС и, частично, тропосферная задержка; аналогичный эффект имеет место при вычитании в (5);

оценки могут быть усреднены по видимым НС и приемным пунктам.

Пусть отношения сигнал/шум по мощности на выходе системы обработки приемника наземного приемного пункта на соответствующих комбинация частота навигационного сигнала /частота ретрансляции составляют $\rho_{1,1}, \rho_{1,2}, \rho_{2,1}, \rho_{2,2}$. Нижние оценки дисперсии измерения суммарных дальностей запишутся в виде [11]

$$\sigma_{k,m}^2 = \frac{c^2}{(2\pi)^2 \beta^2 \rho_{k,m}}, \quad (7)$$

где $\beta = \frac{0,26...0,46}{T_0 / K_{sh}}$ - эффективная ширина спектра НС; $T_0 / K_{sh} = \tau_0$ - длительность

дискрета навигационного сигнала, определяемая периодом повторения T_0 и коэффициентом сжатия K_{sh} (для открытого кода GPS $T_0 / K_{sh} = 0,978$ мкс независимо от частоты); c - скорость света; $0,26...0,46$ - коэффициент для полосы пропускания приемника в пределах $(1...4) / \tau_0$.

Дисперсия $D_{TEC_2}^{(1)}$ оценивания ПЭС на трассе «НС-ПП» при ретрансляции частоты L_1 составит

$$D_{TEC_2}^{(1)} = \frac{\sigma_{1,1}^2 + \sigma_{1,2}^2}{\left(K_{\text{ион}} \cdot \left(\frac{1}{f_{150}^2} - \frac{1}{f_{400}^2} \right) \right)^2} = (136,0...43,4) \left(\frac{1}{\rho_{1,1}} + \frac{1}{\rho_{1,2}} \right) \text{TECu}^2. \quad (8)$$

Для $\rho_{1,1} = \rho_{1,2} = 30$ дБ получим среднеквадратическую ошибку (СКО) оценивания ПЭС с использованием сигнала одного НС $\sqrt{D_{TEC_2}^{(1)}} = 0,522...0,296$ TECu. При усреднении по 4 навигационным спутникам, одновременно видимым на СР и на ПП, СКО уменьшится в 2 раза составит $0,26...0,15$ TECu.

Дисперсия измерения ПЭС на трассе «НС-СР» при ретрансляции двух частот навигационного сигнала от одного навигационного спутника на частоту, например, 150 МГц составит

$$D_{TEC_1}^{(1)} = \frac{\sigma_{1,1}^2 + \sigma_{2,1}^2}{\left(40,3 \cdot \left(\frac{1}{f_1^2} - \frac{1}{f_2^2} \right) \right)^2} = (2,9...0,93) \cdot 10^6 \left(\frac{1}{\rho_{1,1}} + \frac{1}{\rho_{2,1}} \right) \text{TECu}^2, \quad (9)$$

Из (9) и (5) следует, что достижение высокой точности определения ПЭС на трассе «НС-СР» связано с достижением больших $40...50$ дБ, значений отношений сигнал/шум в единичном измерении, использовании большого числа приемных пунктов и последующего усреднения на ограниченном временном интервале аналогично методу измерения ПЭС в двухчастотном навигационном приемнике при высокорбитальной томографии. Однако из-за высокой угловой скорости перемещения СР относительно НС и возможной неоднородности электронной концентрации в ионосфере время указанного усреднения ограничено величиной $10...20$ с.

Заключение

Основные преимущества предлагаемого способа оценивания ПЭС определяются расширением числа хордовых измерений, существенным упрощением аппаратуры, размещаемой на спутнике, за счет отказа от размещения на нем прецизионного двухчастотного многоканального навигационного приемника с высокой радиационной стойкостью и большим энергопотреблением, отказом от использования аппаратуры связи с достаточно высокой пропускной способностью, возможность измерения ПЭС путем обработки принятой реализации одновременно по большому числу навигационных спутников, а также дополнительной возможностью высокоточного оценивания координат спутника-ретранслятора.

Реализация измерений ПЭС возможна преимущественно программными средствами при модернизации существующей приемной аппаратуры 150/400 МГц [12] в части преобразования принимаемых сигналов в цифровую форму и интеграции данных от навигационного приемника на приемном пункте в части единого времени, видимых навигационных спутников и навигационного сообщения.

Список использованных источников

1. Алпатов, В. В. Руководство по ионосферным, магнитным и гелио-геофизическим наблюдениям / В. В. Алпатов [и др.] – Москва : ИПГ, 2012. – 270 с.
2. Куницын В.Е. Радиотомография ионосферы / В.Е., Куницын, Е.Д. Терещенко, Е.С. Андреева – М.: Физматлит, 2007. – 336 с.
3. Алпатов В.В., Куницын В.Е., Лапшин В.Б., Романов А.А., Тасенко С.В. Опыт создания Росгидрометом сети радиотомографии для исследования и мониторинга ионосферы // Гелиографические исследования, № 2, 2012. – С. 60-71.
4. 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.
5. Ионозонд / Институт космических исследований Российской академии наук. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://iki.cosmos.ru/missions/ionozond>. Дата доступа 18.10.22.
6. Романов А.А. Измерение полного электронного содержания ионосферы Земли с помощью многочастотного когерентного зондирующего сигнала / А.А Романов, А.В. Новиков // Вопросы электромеханики. Труды НПП ВНИИЭМ. – М.: ФГУП «НПП ВНИИЭМ», 2009. – Т. 111. – С. 31 – 36.
7. Движение наноспутника относительно центра масс на околоземных орбитах: учебное пособие / И.В. Белоконов, И.А. Тимбай. – Самара: Издательство Самарского университета, 2020. – 128 с.
8. Груздов, В.В. Новые технологии дистанционного зондирования Земли из космоса. – М.: Техносфера, 2018. – 482 с.
9. Купряшкин И.Ф. Малогабаритные многофункциональные РЛС с непрерывным частотно-модулированным излучением. Монография. – М.: Радиотехника, 2020. – 280 с.
10. Современные ГНСС | Прикладной потребительский центр ГЛОНАСС [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.glonass-iac.ru>. Дата доступа: 18.10.2022.
11. Тихонов В.И. Статистическая радиотехника. – М. Сов . Радио. 1966.
12. Радиотомографический комплекс для исследований ионосферы и ближнего космоса. Интеллектуальная система тематического исследования наукометрических данных. [Электронный ресурс]. – Режим доступа <https://istina.msu.ru/equipment/card/10360783/?ysclid=175pyou9a9358457142>. Дата доступа 18.10.22.