

УДК 621.396.96

Применение двухполосного метода оценки полного электронного содержания ионосферы по широкополосному сигналу, отраженному от сложного объекта

А. Г. Виноградов, А. Н. Теохаров

Московский физико-технический институт (университет),
Долгопрудный 141701. E-mail: a.vino@mail.ru, teo-haro@mail.ru

Аннотация. Предложено развитие двухполосного метода прямого измерения полного электронного содержания ионосферы (ТЕС) по результатам зондирования сверхширокополосным сигналом сложного объекта. Проведено компьютерное моделирование отражения широкополосных сигналов от сложных целей и оценки ТЕС двухполосным методом. Моделирование показало принципиальную возможность удовлетворительного измерения ТЕС для разных типов сигнала в широком диапазоне возмущений ионосферы, а также в присутствии аддитивного шума.

Ключевые слова: полное электронное содержание ионосферы, дисперсионные искажения, широкополосный радиолокационный сигнал, согласованная фильтрация, радиолокация.

Two-band Method of Estimating Complete Electron Content of the Ionosphere Applied to Wideband Signal Reflected from a Complex Object.

A. G. Vinogradov, A. N. Teokharov

Moscow Institute of Physics and Technology (State University), Dolgoprudny 141701.

Abstract. The two-sideband method of estimating the total electron content (TEC) of ionosphere is extended to the case of a wideband radar signal reflected from a complex object. Computer simulation of the wideband radar signal reflection from complex targets was carried out and TEC estimations by the two-sideband method were obtained. Simulation demonstrated the in-principle possibility of acceptable TEC measuring with the use of signals of different types in a wide range of ionosphere distortions, and in presence of an additive noise.

Keywords: complete electron content of ionosphere, dispersion distortions, wideband radar signal, matched filtering, radiolocation.

MSC 2010: 78A50, 78A55, 78M25

Введение

При распространении через ионосферу широкополосного сигнала, позволяющего обеспечить значительную разрешающую способность по дальности, возникают дисперсионные искажения сигнала, которые могут привести к полному разрушению сигнала при его обычной согласованной обработке [2].

Однако при известном значении полного электронного содержания ионосферы (ТЕС — total electron content) вдоль траектории сигнала можно модифицировать обработку, согласовав ее не с излученным, а с ожидаемым сигналом путем коррекции каждой гармоники согласованного фильтра.

В работе [4] изложена идея использовать для оценки ТЕС вдоль трассы сам принимаемый широкополосный сигнал, обрабатывая его в линейке согласованных фильтров, настроенных на последовательность значений ТЕС с определенным шагом вблизи выбранного начального значения. В основу такой методики положено априорное знание характера дисперсионных искажений ультракоротких радиоволн в земной ионосфере — основное влияние на параметры распространяющегося в ней сигнала оказывают продольные ленгмюровские колебания ионосферной плазмы [5].

В работах [1, 3] предложен двухполосный метод оценки ТЕС вдоль луча радиолокатора. В работе [3] на основе компьютерного моделирования отражения разных широкополосных сигналов показана принципиальная возможность прямого измерения ТЕС в реальном времени даже по единичному отклику радиолокатора без использования дополнительных измерительных средств в присутствии значительного аддитивного зашумления. В частности, в работе [3] рассматривались широкополосные сигналы с линейной модуляцией частоты (ЛЧМ сигналы), и шумоподобные импульсные сигналы с фазовой кодовой манипуляцией импульсов (ФКМ сигналы).

В основе двухполосного метода лежит формирование парциальных фильтров, согласованных с зондирующим сигналом в разных участках спектра (а именно, в «высокочастотном» и «низкочастотном» или «левом» и «правом» участках спектра) и устраняющих остальные гармоники. Сама оценка ТЕС зависит от обусловленной ионосферной дисперсией относительной задержки откликов на выходе этих фильтров и вычисляется по формуле [1, 3]

$$\text{ТЕС} = \frac{3}{8080} \cdot \Delta t_{\text{лп}} \cdot \left(\frac{1}{F_{0\text{л}}^2} - \frac{1}{F_{0\text{п}}^2} \right)^{-1}. \quad (1)$$

Здесь $\Delta t_{\text{лп}} = \Delta t_{\text{л}} - \Delta t_{\text{п}}$ — относительная задержка принятого сигнала на выходах «левого» и «правого» фильтров в мксек, $F_{0\text{л}}$, $F_{0\text{п}}$ — несущие частоты «левого» и «правого» фильтров в МГц, а ТЕС измеряется единицах ТЕС — TECU, 1 TECU = 10^{16} эл/м².

1. Особенности отражения широкополосного сигнала от сложной цели

В упомянутой работе [3] был использован ряд допущений, которые позволяли сформулировать разработанную методику оценки ТЕС и показать на моделях принципиальную возможность реализации предложенного алгоритма, позволяющего с достаточной степенью достоверности получить оценку ТЕС с приемлемой погрешностью.

Основное допущение состояло в использовании отражающего объекта в виде компактного (точечного) объекта, коэффициент рассеяния (отражения) которого не зависит от частоты. При отражении от точечного объекта это приемлемо, поскольку неискаженные отклики после фильтрации в «правом» и «левом» парциальных фильтрах представляют собой кривые с единственным хорошо выраженным пиком (максимумом) в моменты времени, соответствующие задержкам $\Delta t_{\text{п}}$, $\Delta t_{\text{л}}$.

Между тем, само использование широкополосных (сверхширокополосных) сигналов продиктовано необходимостью повысить мощность сигнала (и, соответственно, отношение сигнал/шум) и улучшить пространственное (радиальное) разрешение объекта. Потенциальная разрешающая способность радиолокационного сигнала по дальности ΔR определяется шириной полосы ΔF : $\Delta R = c/2\Delta F$, c — скорость света. Например, при полосе частот 250 МГц $\Delta R \approx 0,6$ м. Реальные отражающие объекты имеют обычно бóльшие размеры и их нельзя представить в виде точечной цели. Поэтому допущение о точечности отражающего объекта при использовании алгоритма двухполосного метода оценки ТЕС в прикладных задачах должно быть снято.

В данной работе мы учитываем отражение сигнала от сложного пространственно-распределенного объекта. Отклики «левого» и «правого» парциальных фильтров, как и полного согласованного фильтра представляют собой в этом случае сложные кривые с несколькими пиками, соответствующими компактными отражающим областям на объекте («блестящим точкам»). Такие пики могут иметь сравнимые амплитуды, пересекаться друг с другом и т.п., в результате чего отклики приобретают сложную структуру, и использование допущения о «точечности» объекта будет приводить к ошибочным оценкам задержек и — в конечном итоге — к неправильным оценкам ТЕС. В качестве примера на рис. 1 приведен характерный отклик согласованного фильтра при отражении широкополосного ЛЧМ сигнала от сложной цели с пятью блестящими точками.

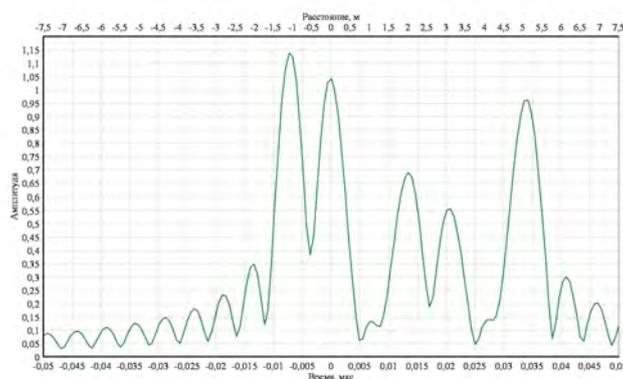


Рис. 1. Характерный отклик от сложного объекта

Здесь предлагается усовершенствованный алгоритм оценки относительной задержки $\Delta t_{\text{лп}}$, основанный на достаточно правдоподобном предположении о схожести (подобии) временных откликов «правого» и «левого» фильтров $s_{\text{л,п}}(t)$ с локальными максимумами, соответствующими расположению «блестящих точек» на отражающем объекте. Алгоритм состоит в вычислении функции корреляции амплитуд кривых

$$K(\tau) = \int |s_{\text{п}}(t)s_{\text{л}}(t + \tau)| dt \quad (2)$$

и нахождения временного сдвига $\tau_{\text{м}}$, дающего максимум $K(\tau_{\text{м}}) = \max(K(\tau))$. Тогда имеем оценку

$$\Delta t_{\text{лп}} = \tau_{\text{м}}. \quad (3)$$

Данный алгоритм позволяет снять допущение о «точечности» отражающего объекта, поскольку работает и со сложными (но похожими) кривыми. К его достоинствам следует отнести и то, что результатом его работы является относительная задержка сигналов $s_{\text{л,п}}(t)$, требуемая для оценки ТЕС, а не задержки $\Delta t_{\text{п}}$, $\Delta t_{\text{л}}$ по отдельности.

2. Алгоритм оценки несущих частот парциальных фильтров

Другими параметрами, влияющими на точность оценок ТЕС по формуле (1), являются несущие частоты $F_{0\text{л}}$, $F_{0\text{п}}$ «левого» и «правого» согласованных фильтров. В работе [3] они оценивались простейшим образом — только по ширине полосы излученного сигнала ΔF ($F_{0\text{л,п}} \approx F_0 \mp \Delta F/3$ при вырезании $1/3$ центральной части спектра принятого сигнала).

Такая оценка несущих частот парциальных фильтров приемлема для широкополосного ЛЧМ сигнала в силу того, что модуль его спектра имеет почти прямоугольную форму. Однако спектры других типов сигналов, в частности, широкополосных шумоподобных ФКМ сигналов, характеризуются более сложным поведением, и для них требуется более сложный алгоритм оценки несущих частот парциальных фильтров.

В качестве несущих частот парциальных фильтров предлагается использовать средние взвешенные частоты этих фильтров

$$F_{0\text{п,0л}} = \frac{\int_0^{\infty} F |S_{0\text{п,0л}}(F)|^2 dF}{\int_0^{\infty} |S_{0\text{п,0л}}(F)|^2 dF} \quad (4)$$

с весовой функцией, пропорциональной спектру мощности соответствующего «сигнала».

3. Параметры моделирования двухполосного метода оценки ТЕС

Для демонстрации возможностей использования двухполосного метода оценки ТЕС при отражении от сложной цели было проведено компьютерное моделирование с использованием сигналов двух типов с похожими параметрами, при которых явно сказываются эффекты искажения при прохождении через ионосферу:

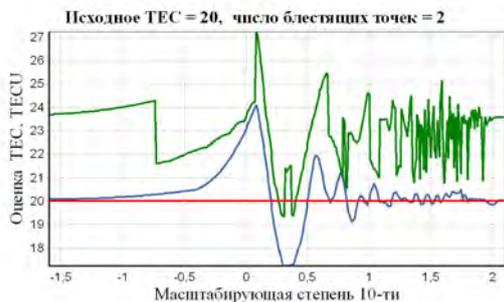
– сигнал с линейной модуляцией частоты (ЛЧМ сигнал) длительностью $T = 0,3024$ мкс с несущей частотой $F_0 = \omega_0/2\pi = 1300$ МГц и шириной полосы спектра $\Delta F = \Delta\omega/2\pi \approx 250$ МГц;

– фазоманипулированный шумоподобный импульсный сигнал с кодовой манипуляцией импульсов на основе M-последовательности (ФКМ или ФМн сигнал), состоящий из 63 импульсов длительностью $T_n = 0,0048$ мкс каждый, ширина полосы такого сигнала $\Delta F \approx 250$ МГц.

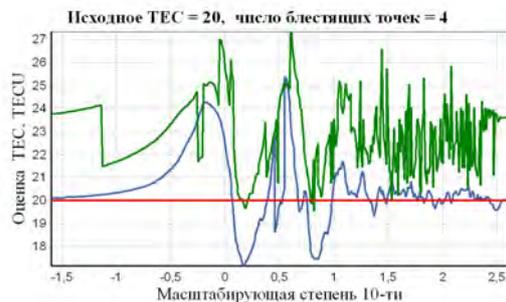
Модельные рассеивающие объекты составлялись из отдельных блестящих точек, каждая из которых характеризуется парой чисел $(\Delta x, \sigma)$, где Δx — смещение вдоль радиолуча относительно первой, а σ — её коэффициент рассеяния. В расчетах использовались: двухточечный объект = $[(0, 1), (1, 0,5)]$; четырехточечный объект = $[(0, 1), (-0,5, 0,7), (1,7, 0,8), (-3, 0,5)]$; шеститочечный объект = $[(0, 1), (0,2, 0,5), (-1, 0,7), (-0,5, 0,7), (0,7, 0,8), (-3, 0,8)]$. Перед началом расчета смещения нормировались таким образом, чтобы среднее расстояние между соседними точками равнялось длине волны зондирующего сигнала.

Для выявления зависимости качества работы алгоритма от расстояния между блестящими точками задержки от точек умножаем на масштабирующий множитель: $\tau_i = C_M \tau_i^{\text{исх}}$, где $C_M = 10^x$, а x — масштабирующая степень. Рассматриваем изменение масштабирующей степени примерно от $-1,5$ до $2,5$. Малые значения C_M (при отрицательных x) соответствуют близкому расположению блестящих точек (в масштабе длины волны сигнала), когда отражающий объект фактически можно рассматривать как одну отражающую точку. Большие положительные значения C_M (при положительных x) означают, что сложная цель распадается на отдельные точечные цели, на которых происходит независимая согласованная обработка. В этих крайних случаях пространственная распределенность объекта не сказывается на обработке и ее можно рассматривать как согласованную обработку для точечного объекта (или нескольких отдельных точечных объектов), как в работе [3]. Принципиальные проблемы, связанные со сложным характером объекта, возникают в промежуточной области $x \approx 0$, что и снимается предложенным здесь корреляционным алгоритмом обработки (2)–(3).

Для оценки влияния степени искажения сигнала мы рассматриваем (условно) ионосферу со слабым (ТЕС = 20 TECU), средним (ТЕС = 50 TECU), а также сильным (ТЕС = 100 TECU) возмущениями.



(a) Объект с 2 б.т., ТЕС = 20



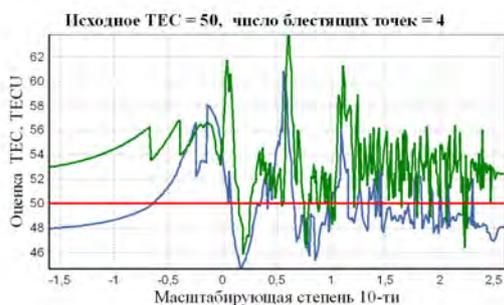
(b) Объект с 4 б.т., ТЕС = 20



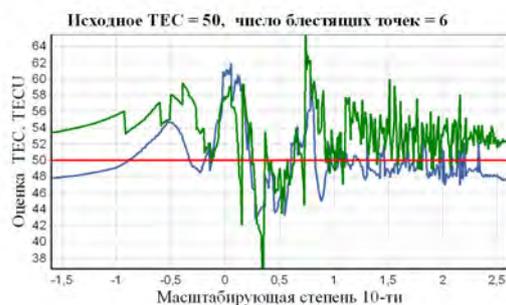
(c) Объект с 6 б.т., ТЕС = 20



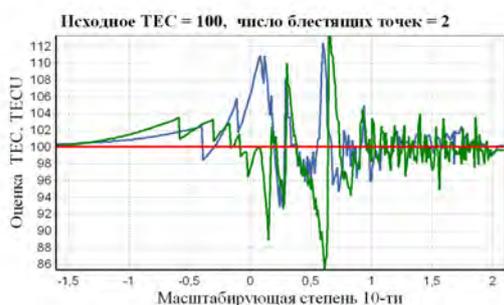
(d) Объект с 2 б.т., ТЕС = 50



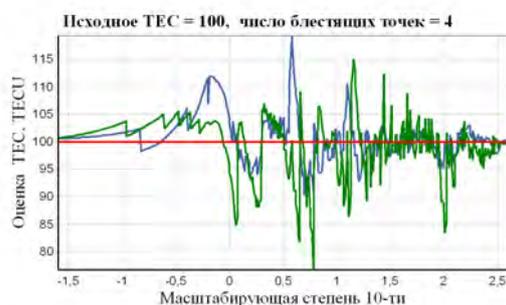
(e) Объект с 4 б.т., ТЕС = 50



(f) Объект с 6 б.т., ТЕС = 50

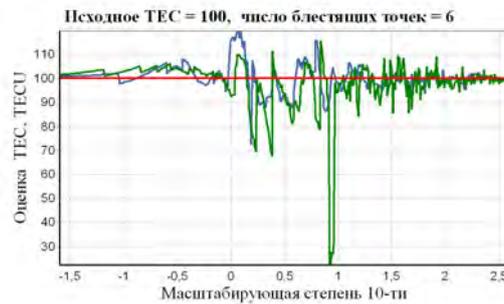


(g) Объект с 2 б.т., ТЕС = 100



(h) Объект с 4 б.т., ТЕС = 100

Рис. 2. Оценки ТЕС для разных типов сигналов (ЛЧМ — синий и ФМн — зеленый).



(i) Объект с 6 б.т., ТЕС = 100

Рис. 2. Оценки ТЕС для разных типов сигналов (продолжение).

4. Сравнение качества оценки ТЕС для разных типов сигналов

Результаты моделирования по сравнению излучения разных типов радиолокационных сигналов (ЛЧМ и ФМн сигналы с приведенными ранее параметрами) показаны на рис. 2(а)–2(і). Графики рассчитаны для разных условий возмущения и разных отражающих объектов; синяя кривая соответствует ЛЧМ сигналу, а зеленая — ФКМ сигналу.

Из этих графиков следует, что оценка ТЕС с использованием ФМн сигнала в среднем дает завышенные результаты (примерно на 3 ТЕСУ), что особенно заметно при слабой возмущенности ионосферы, тогда как ЛЧМ сигнал несколько занижает (примерно на 1 ТЕСУ) значение оценки. С усилением возмущенности этот эффект становится менее заметным, и при ТЕС = 100 ТЕСУ практически исчезает.

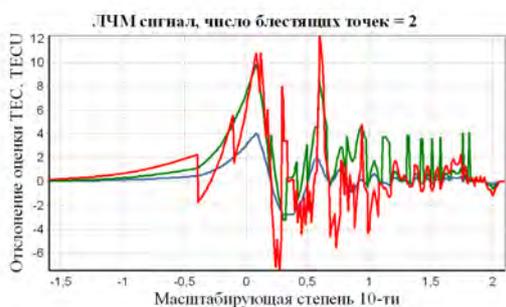
Значительные отклонения оценки от истинного значения ТЕС имеют место, как и ожидалось, в области $0 < x < 1$. Даже в этой области большие (> 10 ТЕСУ) отклонения оценки от истинного значения редки как для ЛЧМ, так и для ФМн сигнала, из чего можно заключить, что оба типа сигналов пригодны для измерения ТЕС.

5. Сравнение качества оценки ТЕС для разных условий возмущения ионосферы

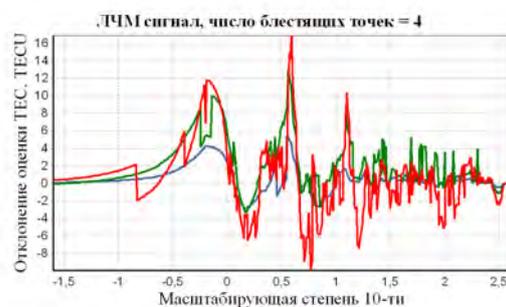
Результаты моделирования по сравнению оценки ТЕС для разных условий возмущения ионосферы (слабое, среднее и сильное возмущение) показаны на рис. 3(а)–3(ф). При этом графики рассчитаны для разных типов сигнала и разных отражающих объектов, по оси ординат показаны отклонения оценок ТЕС от точечной оценки, синяя кривая соответствует исходному значению ТЕС = 20, зеленая — ТЕС = 50, а красная — ТЕС = 100.

Видно, что даже в условиях сильно возмущенной ионосферы погрешность оценки ТЕС лишь изредка превышает 10 ТЕСУ, то есть эта оценка вполне при-

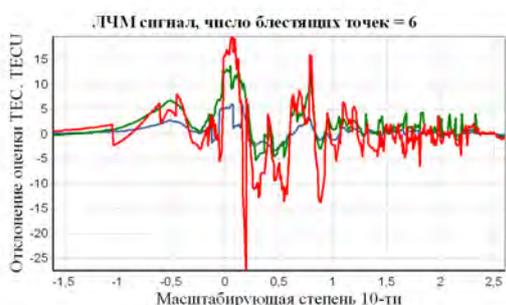
годна для использования во многих приложениях. В частности, при такой погрешности остаточные дисперсионные искажения ухудшают потенциальную разрешающую способность сигнала всего на несколько процентов.



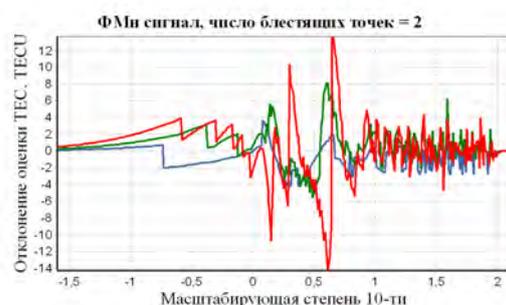
(а) ЛЧМ сигнал, объект с 2 б.т.



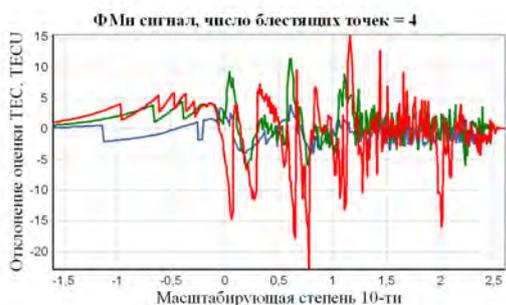
(б) ЛЧМ сигнал, объект с 4 б.т.



(с) ЛЧМ сигнал, объект с 6 б.т.



(д) ФМн сигнал, объект с 2 б.т.



(е) ФМн сигнал, объект с 4 б.т.



(ф) ФМн сигнал, объект с 6 б.т.

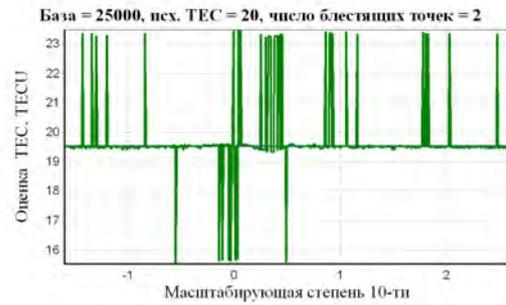
Рис. 3. Оценки ТЕС для разных возмущений (ТЕС = 20 — синий, 50 — зелёный, 100 — красный).

6. Влияние аддитивного шума на качество оценки ТЕС

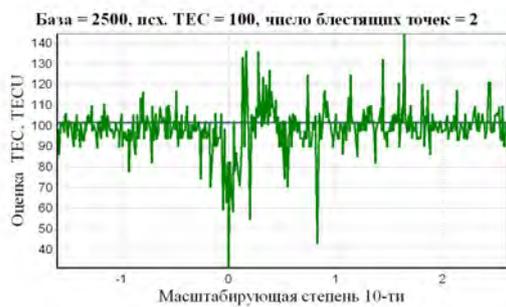
Результаты моделирования по сравнению качества оценки ТЕС для ЛЧМ сигналов с полосой частот $\Delta F = 250$ МГц и разной базой ($T \cdot \Delta F = 2500; 25000$) показаны на рис. 4(а)–4(г). Для формирования базы использовались сигналы длительностью $T = 10$ и 100 мкс.



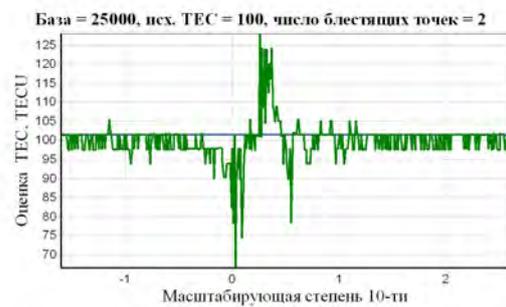
(а) База 2 500, ТЕС = 20, объект с 2 б.т.



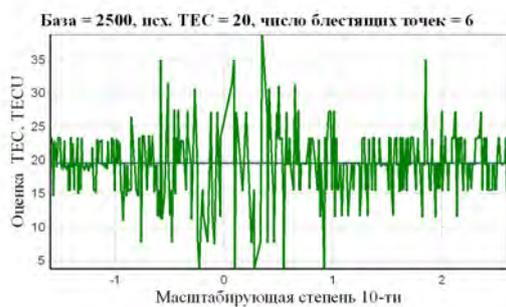
(б) База 25 000, ТЕС = 20, объект с 2 б.т.



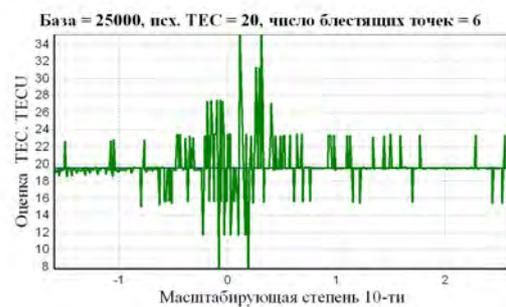
(в) База 2 500, ТЕС = 100, объект с 2 б.т.



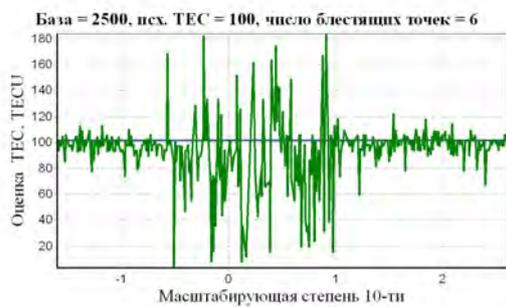
(д) База 25 000, ТЕС = 100, объект с 2 б.т.



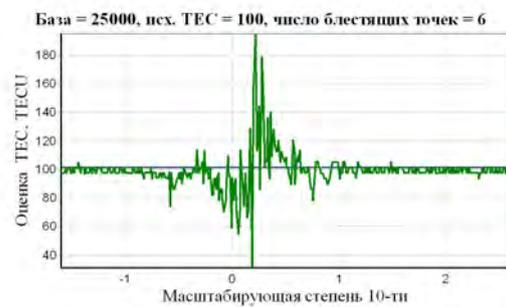
(е) База 2 500, ТЕС = 20, объект с 6 б.т.



(ф) База 25 000, ТЕС = 20, объект с 6 б.т.



(г) База 2 500, ТЕС = 100, объект с 6 б.т.



(х) База 25 000, ТЕС = 100, объект с 2 б.т.

Рис. 4. Оценки ТЕС для ЛЧМ сигналов с разной базой

Графики рассчитаны для разной степени возмущения ионосферы ($TEC = 20$ и 100 TECU) и разных отражающих объектов, составленных из 2 и 6 блестящих точек. Однократная оценка TEC проводилась с аддитивным зашумлением сигнала при отношении сигнал/шум равным -10 дБ. Из приведенных графиков следует, что наибольшие погрешности оценки приходятся на область $0 < x < 1$, то есть на область, в которой расстояния между блестящими точками сравнимы с длиной волны зондирующего сигнала. В этих условиях интерференция откликов от отдельных блестящих точек может практически полностью подавить полезный сигнал, из-за чего заметно усиливается влияние шума. Кроме того, увеличение базы сигнала заметно повышает качество оценки TEC.

7. Выводы

1. Показана принципиальная возможность использования двухполосного метода для прямого измерения TEC по данным зондирования сложного объекта сверхширокополосным сигналом.
2. Двухполосный метод работает для разных видов сверхширокополосного сигнала (широкополосных ЛЧМ и ФКМ-сигналов) в широком диапазоне возмущений ионосферы.
3. Предложенный двухполосный метод удовлетворительно работает даже в условиях резонансных отражений от сложного объекта при расстояниях между блестящими точками, близкими к длине волны сигнала.
4. В присутствии аддитивного шума двухполосный метод дает лучшие оценки TEC при увеличении базы сигнала.

Список цитируемых источников

1. *Аджемов С. С., Виноградов А. Г., Лобов Е. М., Теохаров А. Н.* Прямая оценка полного электронного содержания ионосферы (TEC) путем специальной обработки широкополосного радиолокационного сигнала // Сборник трудов научно-технической конференции «Системы синхронизации, формирования и обработки сигналов в инфокоммуникациях» «СИНХРОИНФО 2015». — С-Петербург, 2015. — С. 167–169.
Adjemov S. S., Vinogradov A. G., Lobov E. M., Teokharov A. N. (2015). Direct Evaluation of the Total Electron Content (TEC) of Ionosphere by Wideband Radar Signal Special Processing. In Proceedings of the Scientific Conference «SYNCHROINFO 2015», St-Petersburg, 167–169. (in Russian)
2. *Виноградов А. Г., Лучин А. А., Теохаров А. Н.* Обработка сверхширокополосных сигналов и формирования радиолокационных изображений в РЛС дальнего обнаружения L-диапазона. // Научные технологии. — 2013. — Т. 14, №9. — С. 32–36.
Vinogradov A. G., Luchin A. A., Teokharov, A. N. (2013). Problems of Processing Very Broadband Signals and Constructing Radar Images in Long-Range Radars of L-Range. *Naukoemkie tekhnologii* (Science Intensive Technologies) 14:9, 32–36. (in Russian)
3. *Виноградов А. Г., Теохаров А. Н.* Двухполосный метод оценки полного электронного содержания ионосферы по сигналам широкополосной РЛС. // *Динамические системы*. — 2016. — Т.6(35), №3. — С. 273–285.

- Vinogradov A. G., Teokharov, A. N. (2016). Two-Sideband Method for Estimating Total Electron Content of the Ionosphere Using Signals of Wideband Radar. *Dinamicheskie Sistemy* 6(35), No.3, 273-285. (in Russian)
4. *Виноградов А. Г., Теохаров А. Н.* Прямая оценка полного электронного содержания ионосферы (ТЕС) по искажениям широкополосного радиолокационного сигнала. // Тезисы международной конференции «Метод функций Ляпунова и его приложения». — Алушта —2014, 15-20 сент. — С. 80.
- Vinogradov A. G., Teokharov, A. N. (2014). Direct Estimation of the Total Electron Content (TEC) of the Ionosphere from Distortion of a Broadband Radar Signal. In Proc. of the International Conference «Lyapunov Functions Method and its Application», Alushta, Sept. 15-20, 2014, 80. (in Russian)
5. *Гинзбург В. Л.* Распространение электромагнитных волн в плазме. — М.: Наука, 1967.
- Ginzburg V. L. (1970). *The Propagation of Electromagnetic Waves in Plasmas.* — Oxford-New York: Pergamon Press.

Получена 28.11.2016