

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2022.9.2>

УДК: 523.31

СПУТНИКОВЫЕ НАВИГАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ КАК ИСТОЧНИК ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОСОБЕННОСТЕЙ РАСПРОСТРАНЕНИЯ РАДИОВОЛН ПО ИОНОСФЕРНЫМ РАДИОЛИНИЯМ

В.М. Смирнов, Е.В. Смирнова

ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, Фрязинский филиал
141190, г. Фрязино, пл. Введенского, 1

Статья поступила в редакцию 21 июля 2022 г.

Аннотация. Приведены основные пространственно-временные характеристики неоднородностей, возникающих в ионосферной плазме. Изображены модели ионосферного радиоканала с учётом неоднородностей крупного, среднего и мелкого масштабов для навигационных спутниковых систем. Представлены результаты измерений и обработки данных этих систем. Показано, что ионосферные неоднородности, возникающие на трассе распространения, могут приводить к сильным замираниям сигнала. По глубине замирания определены индексы сцинтилляций, значения которых позволяют отнести их к классу слабых-средних замираний. Использование второй производной фазы навигационных сигналов позволило отнести эти неоднородности к классу мелкомасштабных.

Ключевые слова: ионосфера, навигационные спутники, неоднородности, сцинтилляции.

Финансирование: Работа выполнена в рамках государственного задания ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН № 075-01133-22-00

Автор для переписки: Смирнов Владимир Михайлович, vsmirnov@ire.rssi.ru

Введение

Интерес к проблеме изучения возмущений, возникающих в плазменной оболочке земной атмосферы, обусловлен тем, что эти исследования имеют важные прикладные аспекты. Существенное влияние на снижение показателей качества систем спутниковой связи и спутниковых радионавигационных систем оказывают флуктуации фазы и амплитуды принимаемых сигналов (т.н. замирания или мерцания), вызванные рассеянием или дифракцией электромагнитных волн на неоднородностях ионосферы [1–4]. В связи с этим возникает задача организации мониторинга текущего состояния ионосферы, который позволит оперативно адаптировать параметры используемых сигналов и аппаратуры пользователей спутниковой связи и навигации к изменению условий трансionoсферного распространения радиоволн. Ранее проведенные наземные и космические исследования показали, что изменчивость и неоднородность являются характерной особенностью ионосферы.

Неоднородности ионосферы проявляются в вариациях различных параметров среды: полного электронного содержания, электронной концентрации, температуры ионов и электронов. Все параметры ионосферы испытывают флуктуации относительно некоторого фона, за который обычно принимают спокойную медиану. На регулярную структуру ионосферы всегда наложены неоднородности, вызванные теми или иными гелиогеофизическими факторами, которые обнаруживаются либо прямыми методами измерений, либо по флуктуациям радиосигналов, прошедших через ионосферу или отраженных от нее. Флуктуации электронной концентрации обуславливают неоднородную, быстро меняющуюся микроструктуру ионосферы, представляющую собой совокупность локальных образований, изменяющихся во времени и пространстве.

При распространении по трансionoсферным радиополосам происходит искажение фазо-частотных и амплитудно-частотных характеристик комплексных огибающих радиолокационных зондирующих сигналов за счет дисперсионных свойств ионосферы. Эти искажения приводят к энергетическим

потерям при корреляционной обработке сигналов и снижению качества работы спутниковых систем радиолокации по отношению к распространению в свободном пространстве.

1. Характеристики ионосферных неоднородностей

Ионосферные неоднородности распределены в околоземном космическом пространстве крайне неравномерно. Наибольшая возмущенность в ионосфере наблюдается в районе полярной шапки ($60-70^\circ$ с.ш.). В экваториальной области она наблюдается на широтах до $\pm 25^\circ$ и на высотах 95-1000 км в основном ночью. Характерной особенностью экваториальной ионосферы является возникновение возмущений у основания F -слоя и их перемещение вверх до высот порядка 1000 км со скоростями от 60 до 150 м/с. Обычно это сильно вытянутые (их соотношение размеров достигает 7:1 и более) области («всплывающие пузыри» – «bubbles») с пониженной на 60-80% плотностью по сравнению с фоновой плотностью ионизации [5-7]. Размеры их достигают нескольких десятков или сотен километров. В нижней части экваториальной F -области ионосферы развиваются неоднородности метрового масштаба. Электронная концентрация в мелкомасштабных неоднородностях отличается от фоновой на $\pm 20\%$. Интенсивность таких структур носит сезонный характер с максимумом в осеннее равноденствие и увеличивается с ростом солнечной активности. В высоких широтах неоднородности ионосферной плазмы распределены по всей толще F -слоя. Размеры неоднородностей – от десятков метров до сотен километров. Вариации электронной концентрации могут достигать 50-70% относительно фоновой [5-7].

Ионосферные неоднородности, влияющие на изменение амплитуды и фазы радиоволн, могут иметь размеры от нескольких метров до нескольких километров. На высоте нижней ионосферы 60...80 км, в области D, преобладают, в основном, мелкие неоднородности, размеры которых не превышают десятков метров. В слое E ионосферы наблюдаются преимущественно неоднородности размером 200...300 м, а в слое F2 их размеры могут достигать нескольких сотен

километров. Неоднородности слоя F2 вносят определяющий вклад в флуктуации амплитуды и фазы радиоволн, проходящих через них. Они вытянуты вдоль силовых линий магнитного поля Земли и имеют продолговатую форму. Среднее значение крупномасштабных неоднородностей днем составляет около 200 км, ночью около 500 км. Время жизни таких неоднородностей достигает несколько сотен секунд. Дрейф крупных неоднородностей в слое F2 может происходить со скоростью 100-500 м/с [8].

Мелкомасштабные неоднородности с поперечным размером от одного до нескольких метров, сильно вытянутые вдоль силовых линий магнитного поля Земли, характерны для полярной и экваториальной ионосферы. Эти неоднородности ответственны за «авроральные радиоотражения» и «экваториальное радиоэхо». На средних широтах такие неоднородности, как правило, не возникают. Авроральные радиоотражения регистрируются в очень широком диапазоне частот (от 50 МГц до 3 ГГц) и расположены на высотах 100-120 км [9]. Наблюдается также суточный ход радиоотражений, который имеет свои особенности в зависимости от широты и излучаемой частоты. Однако общим для всех геомагнитных широт является наличие вечернего максимума и минимума в поздние утренние часы. Зона появления авроральных радиоотражений охватывает интервал геомагнитных широт от 60° до 80° , с максимумом на широте примерно 67° . Во время сильных геомагнитных возмущений отражения могут наблюдаться и вне этого диапазона.

Существуют экспериментальные свидетельства о том, что крупномасштабные ионосферные неоднородности (спорадические слои *E* в их числе) служат не только источником для мелкомасштабных плазменных неустойчивостей в ионосфере [10], но и, по-видимому, характеризуют динамику крупномасштабных движений планетарного масштаба [11,12].

2. Модели трансionoсферного радиоканала

Классификация ионосферных неоднородностей осуществляется на основе значений их пространственно-временных масштабов, величины изменения

электронной концентрации в них и скорости их перемещения. Пространственно-временные масштабы ионосферных неоднородностей зависят, как правило, от источников их возникновения. Средние спектры мощности вариаций полного электронного содержания для спокойных и возмущённых геомагнитных условий приведены на рис. 1 [5].

Здесь римскими цифрами обозначены зоны перемещающихся ионосферных неоднородностей: I – крупномасштабных, II – среднемасштабных и III – мелкомасштабных.

На рис. 2 представлены 3 модели трансionoсферного радиоканала «НКА (навигационный космический аппарат) – навигационный приёмник»: а) без учёта неоднородностей электронной концентрации, б) с учётом крупномасштабных неоднородностей электронной концентрации $\Delta N(h)$, в) с учётом неоднородностей крупного, среднего и мелкого масштабов [13].

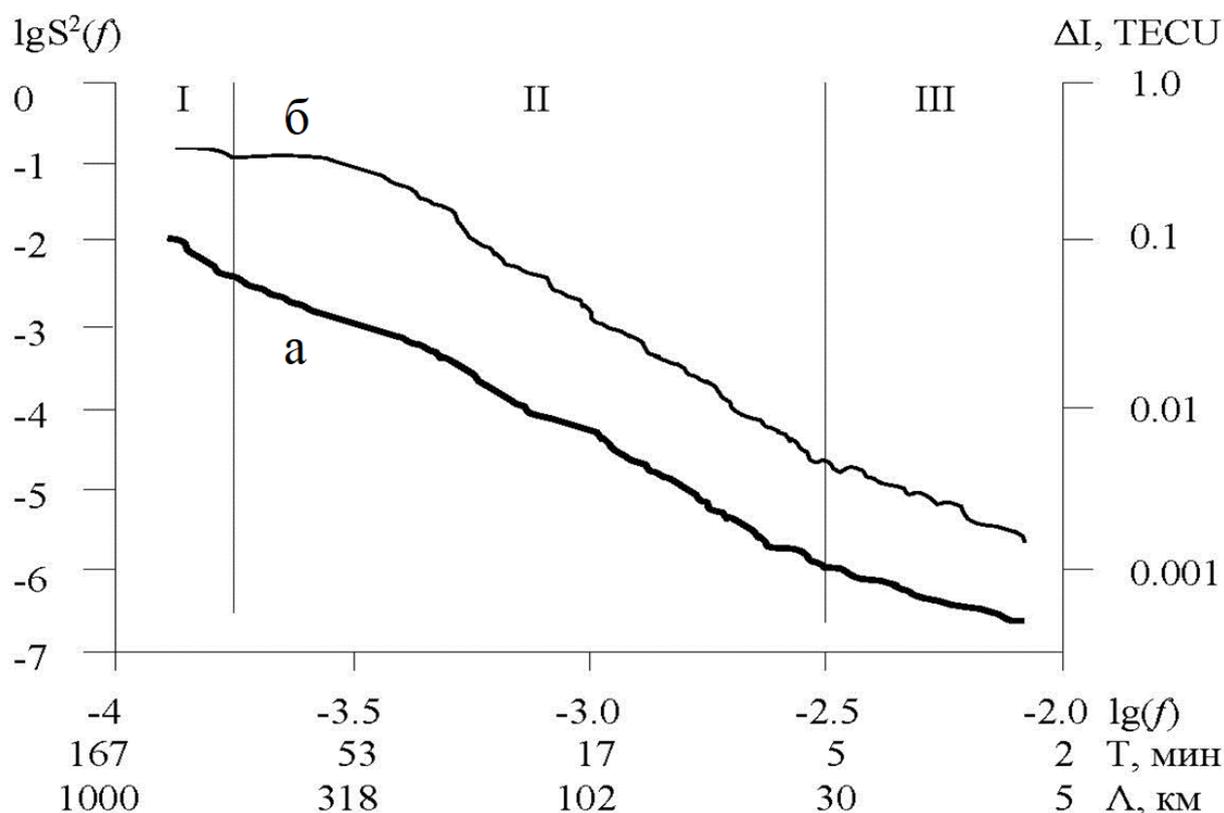


Рис. 1. Средние спектры мощности вариаций полного электронного содержания для спокойных (а) и возмущённых (б) геомагнитных условий [5]

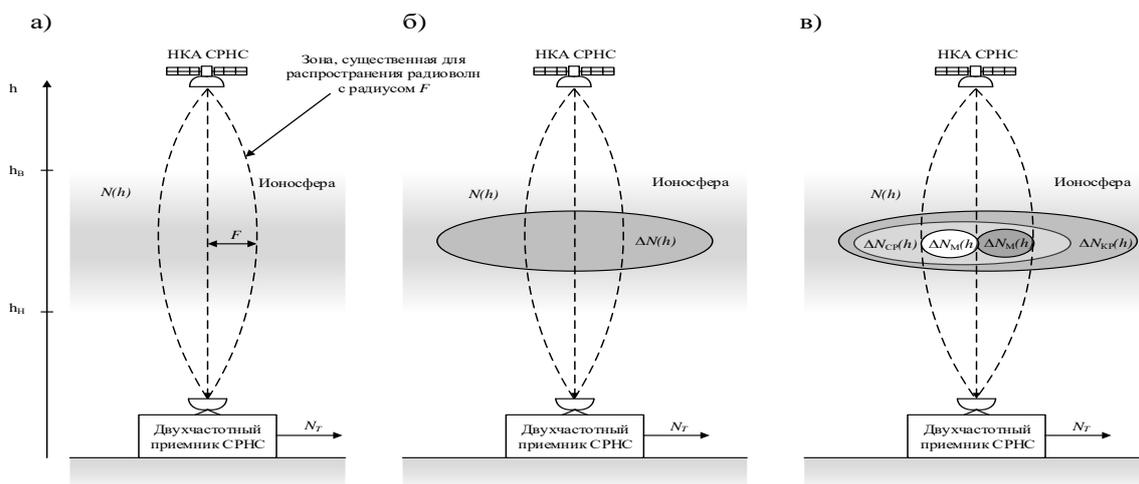


Рис. 2. Модели трансionoсферного радиоканала [13]

Некоторые статистические модели узкополосных трансionoсферных линий, определяющих возникновение замираний сигналов за счет случайных временных и пространственных флуктуаций электронной плотности ионосферных неоднородностей, рассмотрены в [14-16]. Наличие таких моделей позволяет вычислить статистические характеристики вариаций мощностей сигналов (например, средних мощностей, др.) и, как следствие, оценить соответствующие энергетические потери, которые необходимо учитывать в энергетических бюджетах радиолиний.

Основой описания процесса распространения радиоволн в статистически неоднородной среде является волновое уравнение для компонент электромагнитного поля. Оно получается из уравнений Максвелла, в предположении, что флуктуации диэлектрической проницаемости среды малы по сравнению с её средними значениями, а размеры неоднородностей велики по сравнению с длиной волны. В этом случае уравнение записывается в следующем виде

$$\nabla^2 E + k^2 \varepsilon(r, f) E = 0. \quad (1)$$

Здесь $k = \frac{2\pi f}{c}$ – волновое число, f – частота, $\varepsilon(r, f)$ – диэлектрическая проницаемость среды, c – скорость света в свободном пространстве.

Для частного случая плоской волны $E(z, f)$ при ее при распространении вдоль оси z , нормально падающей на слой неоднородной среды с

диэлектрической проницаемостью $\varepsilon(z, f)$, с граничным условием $E(0, f)$ при $z = 0$, уравнение (1) записывается в виде волнового уравнения [17]

$$\frac{d^2 E(z, f)}{dz^2} + \frac{(2\pi f)^2}{c^2} \varepsilon(z, f) E(z, f) = 0. \quad (2)$$

При использовании приближения геометрической оптики, достаточным условием применимости которого является медленность изменения диэлектрических свойств среды на длине волны λ , т. е. $\frac{d\varepsilon(z, f)}{dz} \lambda \ll 1$, решение волнового уравнения для неоднородной ионосферы имеет вид [17]

$$E(z) = Re \left(\dot{E}(0, t) \exp \left(-\frac{j2\pi f}{c} \int_0^H \sqrt{\varepsilon(z, f)} dz \right) \right). \quad (3)$$

Оно устанавливает связь между характеристиками среды распространения и параметрами сигнала на выходе линии передачи.

3. Сцинтилляции сигналов

Замирания (сцинтилляции) сигналов при их распространении по спутниковым ионосферным линиям вызываются, как правило, многолучевостью распространения, обусловленной рассеянием на ионосферных неоднородностях [1]. Случайные временные и пространственные флуктуации электронной плотности ионосферных неоднородностей, вызывающие флуктуации коэффициента преломления среды распространения, приводят к нарушению целостности фронта волны конкретной частоты при пересечениях неоднородностей электронной концентрации δN_e , имеющих масштабы приблизительно сравнимые с первым френелевским радиусом $R_F = \sqrt{2\lambda r}$, где λ – длина волны падающего сигнала, а r – расстояние от ионосферной неоднородности до приемника [18,19]. Статистика наблюдений показывает, что сцинтилляции трансionoсферных радиосигналов преимущественно наблюдаются на частотах от 20 МГц до 10 ГГц [20].

Сцинтилляции сигналов характеризуются индексом сцинтилляции $S_4 = (\langle I^2 \rangle - \langle I \rangle^2) / \langle I \rangle^2$, значения которого определяют важную для приложений характеристику, а именно, диапазон замираний сигналов A_f .

Здесь $I = A^2(t)$ – мощность сигналов; $\langle \rangle$ – операция усреднения по ансамблю сигналов либо по времени, полагая случайный процесс $A(t)$ эргодическим.

По значениям индексы замирания S_4 классифицируются тремя уровнями [6]: слабые до $S_4 < 0.3$; средние $0.3 < S_4 < 0.6$; сильные $S_4 > 0.6$. В соответствии с экспериментальными данными для нормальной ионосферы средних широт значение индекса мерцаний S_4 не превышает 0.3...0.5, т.е. замирания могут быть отнесены к классу слабых-средних замираний, для полярных областей значения S_4 могут достигать 1 и в этом случае замирания могут быть отнесены к классу сильных замираний. Диапазон замираний амплитуды сигналов A_f (дБ) определяется соотношением [21]

$$A_f = 27.5S_4^{1.26}. \quad (4)$$

Достаточно детально исследованы радиолинии L -частотного диапазона, активно используемые спутниковыми системами глобальной навигации (ГЛОНАСС, GPS, Galileo, др.). Глобальность и всепогодность этих систем может служить хорошим источником определения особенностей распространения радиолокационных зондирующих сигналов по ионосферным радиолиниям.

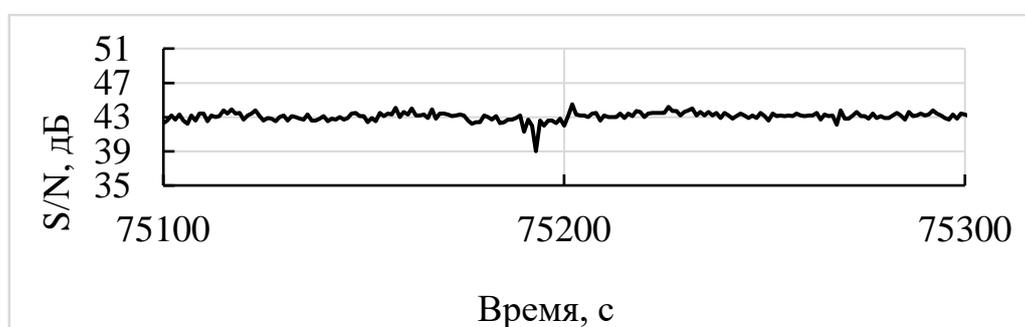
4. Результаты обработки

На рис. 3 представлены записи отношения сигнал/шум для одного из наблюдаемых навигационных спутников. Результаты приведены для частот 1,6 и 1,2 ГГц. Хорошо видно значительное замирание на обеих частотах. Так, на частоте 1,6 ГГц замирание сигнала составило от 10,7 дБ, на частоте 1,2 ГГц – 4.1 дБ. Такие замирания сигналов могут быть обусловлены наличием мелкомасштабных флуктуаций ионосферной плотности. В предположении, что эти замирания вызваны ионосферными сцинтилляциями, можно оценить индекс мерцаний S_4 , используя соотношение (4). Так, для частоты 1,6 ГГц $S_4 = 0,47$, для 1,2 ГГц – $S_4 = 0,22$, что соответствует классу слабых-средних замираний. Длительность замирания сигнала составляет примерно 30 секунд. Такое явление может быть вызвано прохождением ударно-акустической волны,

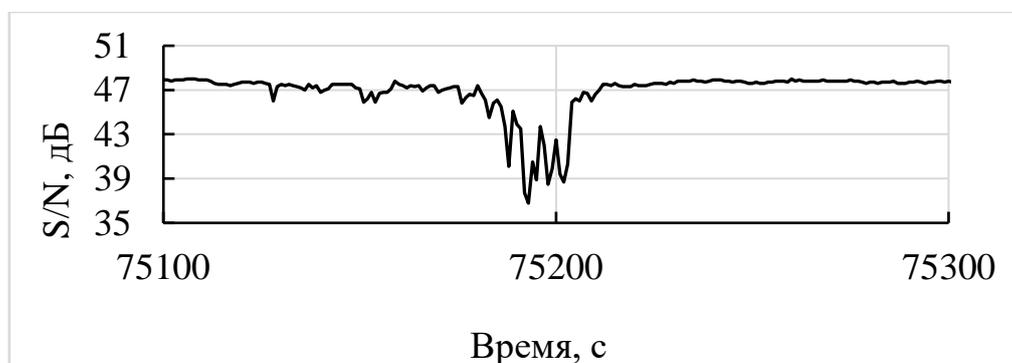
распространяющейся с высокой скоростью (до 1000 м/с) [5]. Различие в глубине замирания может быть обусловлено разными трассами прохождения сигналов. Об этом свидетельствует и отсутствие более сильных вариаций фазы сигнала на частоте 1,2 ГГц (рис. 4в).

Предположение о том, что замирания вызваны ионосферными сцинтилляциями, подтверждается данными, приведёнными на рис. 4. На рисунках справа представлена вторая производная фазы навигационного сигнала $\psi(t) = d^2\varphi/dt^2 \cdot 2\pi$, [рад/с²], являющаяся индикатором мелкомасштабных неоднородностей ионосферы [22]. Методика выделения мелкомасштабных вариаций полного электронного содержания ионосферы по данным трансionoсферного зондирования ранее была предложена в работе [13].

На рис. 4а показано изменение второй производной фазы навигационного сигнала в течение сеанса измерений, на котором пунктиром выделена область её повышенных значений. Более детально этот участок представлен на рис. 4б. Наличие таких неоднородностей может приводить к сильному уменьшению уровня принимаемого сигнала, и, как следствие, к невозможности его приема.



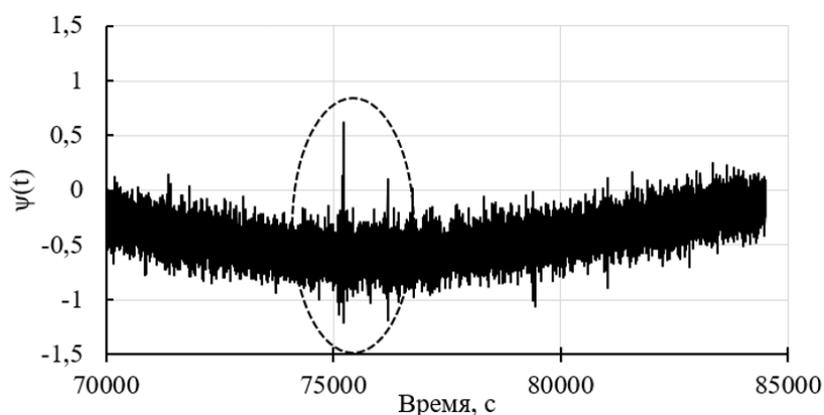
а)



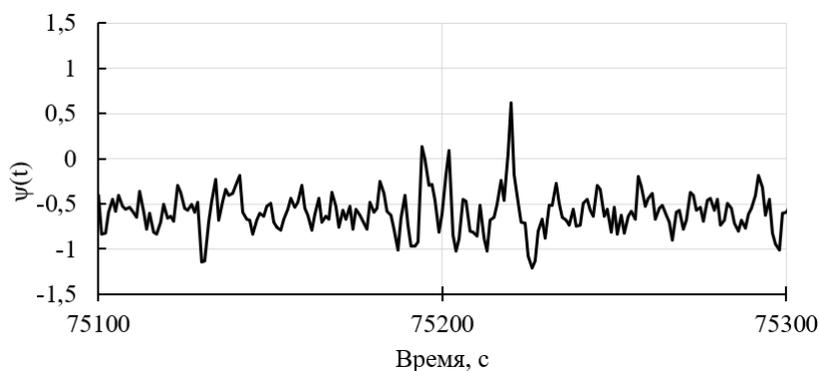
б)

Рис. 3. Отношение сигнал/шум на частотах 1.2 (а) и 1.6 ГГц (б)

Использование данных измерений навигационных спутниковых систем позволяет не только детектировать наличие таких неоднородностей, но и определять их пространственное расположение, что крайне важно при организации проведения сеансов связи в заданных направлениях [23]. Учитывая, что с помощью одного приемника можно принимать сигналы с 15-20 навигационных спутников с разных азимутальных направлений, возможно определение направления и скорости перемещения ионосферных неоднородностей.



а)



б)

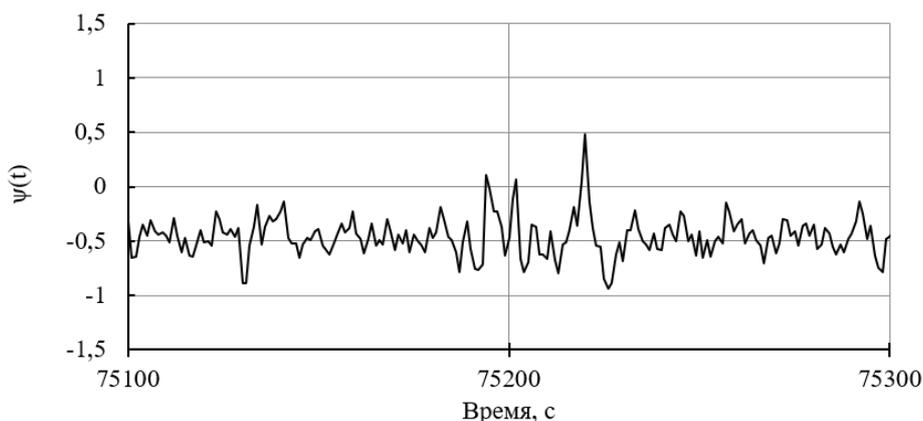


Рис. 4. Вторая производная фазы навигационного сигнала

Заключение

Снижение показателей качества систем спутниковой связи и спутниковых радионавигационных систем вызывают флуктуации фазы и амплитуды принимаемых сигналов, обусловленные ионосферными неоднородностями, присутствующими на трассе распространения. Распределения неоднородностей N_e разных масштабов влияют на распространение сигналов в ионосфере и являются одним из условий образования сцинтилляций сигналов. Поэтому исследования процессов образования и контроль этих распределений представляют интерес для развития бесперебойной связи. В отдельных случаях для одних и тех же событий одновременно с корреляциями в одних конкретных структурах наблюдается ослабление фазовых корреляций при прохождении радиосигналов.

Финансирование: Работа выполнена в рамках государственного задания ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН №075-01133-22-00.

Литература

1. Колосов М.А., Арманд Н.А., Яковлев О.И. *Распространение радиоволн при космической связи*. Москва, Связь. 1969. 155 с.
2. Дэвис К. *Радиоволны в ионосфере*. Москва, Мир. 1973. 502 с.
3. Черенкова Е.Л., Чернышов О.В. *Распространение радиоволн*. Москва, Радио и связь. 1984. 272 с.
4. Пашинцев В.П., Солчатов М.Э., Гахов Р.П. *Влияние ионосферы на характеристики космических систем передачи информации: монография*. Москва, Физматлит. 2006. 184 с.
5. Афраймович Э.Л., Перевалова Н.П. *GPS-мониторинг верхней атмосферы Земли*. Иркутск, ГУ НЦ ВСНЦ СО РАМН. 2006. 480 с.
6. Брюнелли Б.Е., Намгаладзе А.А. *Физика ионосферы*. Москва, Наука. 1988. 528 с.

7. Тащилин А.В. *Формирование крупномасштабной структуры ионосферы в спокойных и возмущенных условиях*. Диссертация на соискание доктора физико-математических наук. ИСЗФ СО РАН. Иркутск. 2014. 265 с.
8. Wang M., Ding F., Wan W. et al. Monitoring global traveling ionospheric disturbances using the worldwide GPS network during the October 2003 storms. *Earth Planet Space*. 2007. V.59. P.407-419. <https://doi.org/10.1186/BF03352702>
9. Кравцов Ю.А., Фейзулин З.И., Виноградов А.Г. *Прохождение радиоволн через атмосферу Земли*. Москва, Радио и связь. 1983. 224 с.
10. Hussey G.C., Schlegel K., Haldoupis C. Simultaneous 50-MHz coherent backscatter and digital ionosonde observations in the midlatitude E region. *Journal Geophysical Research*. 1998. V.103. №4. P.6991-7001. <https://doi.org/10.1029/97JA03089>
11. Tsunoda, R., Yamamoto, M., Igarashi, K., et al. Quasiperiodic Radar Echoes from Midlatitude Sporadic E and Role of the 5-Day Planetary Wave. *Geophysical Research Letters*. 1998. V.25. №7. P.951-954. <https://doi.org/10.1029/98GL00663>
12. Voiculescu M., Haldoupis C., Schlegel K. Evidence for planetary wave effects on midlatitude backscatter and sporadic E layer occurrence. *Geophysical Research Letters*. 1999. V.26. P.1105-1108. <https://doi.org/10.1029/1999GL900172>
13. Пашинцев В.П., Песков М.В., Смирнов В.М., Смирнова Е.В., Тынянкин С.И. Методика выделения мелкомасштабных вариации полного электронного содержания ионосферы по данным трансionoсферного зондирования. *Радиотехника и электроника*. 2017. Т.62. №12. С.1182-1189. <https://doi.org/10.1134/S1064226917110158>
14. Назаров Л. Е., Антонов Д. В., Батанов В.В., Зудилин А. С., Смирнов В. М. Модели сцинтилляции сигналов при распространении по ионосферным спутниковым радиолиниям. *Радиоэлектроника. Наносистемы. Информационные технологии*. 2019. Т.11. №1. С.57-64. <https://doi.org/10.17725/rensit.2019.11.057>

15. Назаров Л.Е., Смирнов В.М. Оценивание вероятностных характеристик приема сигналов с использованием моделей замираний при распространении по трансферным линиям. *Журнал радиоэлектроники* [электронный журнал]. 2020. №11. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2020.11.7>
16. Назаров Л.Е., Смирнов В.М. Вероятностные характеристики приема сигналов с замиранием при распространении по спутниковым ионосферным радиопередачами. *Физические основы приборостроения*. 2020. Т.9. №4(38). С.18-23. <https://doi.org/10.25210/jfop-2004-018023>
17. Яковлев О.И., Якубов В.П., Урядов В.П., Павельев А.Г. *Распространение радиоволн*. Москва, ЛЕНАНД. 2009. 496 с.
18. Кузьмин А.К., Мерзлый А.М., Баныщикова М.А., Чувашов И.Н., Крученицкий Г.М., Потанин Ю.Н., Моисеев П.П. Прикладные аспекты измерений авроральных эмиссий и характеристик полярной ионосферы имаджером «АВРОВИЗОР-ВИС/МП» на перспективном КА «Метеор-МП». *Четвертая международная научно-техническая конференция «Актуальные проблемы создания космических систем дистанционного зондирования Земли»*. Москва. 2016. С.325-341.
19. Kintner P.M., Ladvina B.M., Paula E.R. GPS and ionospheric scintillations. *Space Weather*. 2007. V.5. <https://doi.org/10.1029/2006SW000260>
20. Datta-Barua S., Doherty P.H., Delay S.H. Ionospheric scintillation effects on single and dual frequency GPS Positioning. *Proceedings of the 16th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GPS/GNSS 2003)*. Portland. 2003. 336-346.
21. Recommendation ITU-R P.531-14 (08/2019). *Ionospheric propagation data and prediction methods required for the design of satellite services and systems*. 2019. 25 p.

22. Кашкина Т.В., Демьянов В.В., Ясюкевич Ю.В. Вторая производная фазы по времени как индикатор тонкой структуры ионосферы. *Труды XIV Конференции молодых ученых «Взаимодействие полей и излучения с веществом»*. Физика околоземного космического пространства. Иркутск. 2015. С.115-117.
23. Смирнов В.М., Смирнова Е.В., Секистов В.Н., Мальковский А.П., Тынянкин С.И. Распространение радиоволн коротковолнового диапазона и возможности метода радиопросвечивания ионосферы Земли для расчета максимально применимых частот. *Радиотехника и электроника*. 2008. Т.53. №9. С.1112-1120.

Для цитирования:

Смирнов В.М, Смирнова Е.В. Спутниковые навигационные системы как источник определения особенностей распространения радиоволн по ионосферным радиолиниям. *Журнал радиоэлектроники* [электронный журнал]. 2022. №9. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2022.9.2>