

УДК 621.371.3

Погрешность определения псевдодальности в спутниковой радионавигационной системе при возмущениях ионосферы

Пашинцев В. П., Линец Г. И., Коваль С. А.,
Сенокосов М. А., Мельников С. В.

Постановка задачи: известно, что естественные и искусственные возмущения ионосферы сопровождаются одновременным образованием неоднородностей крупных, средних и мелких масштабов. В настоящее время при проектировании спутниковых радионавигационных систем (СРНС) учитывается возрастание погрешности определения псевдодальности навигационной аппаратурой потребителей в условиях регулярных возмущений ионосферы и образования крупно- и среднемасштабных неоднородностей. Для устранения ионосферной составляющей погрешности определения псевдодальности традиционно используются двухчастотный и дифференциальный режимы работы СРНС, при которых в 2-3 раза возрастает шумовая составляющая погрешности. Поэтому для ее уменьшения вместо сигналов с узкой полосой спектра (1 МГц) используют сигналы с широкой полосой (10 МГц). Однако их применение может привести к значительному (на порядок и более) увеличению шумовой погрешности, если в ионосфере образуются интенсивные мелкомасштабные неоднородности. Это объясняется тем, что рассеяние радиоволн на мелкомасштабных неоднородностях приводит к появлению многолучевости и сужению полосы когерентности трансionoсферного канала до значений менее 1 МГц. Это обуславливает возникновение частотно-селективных замираний принимаемых сигналов, которые вызывают возрастание шумовой погрешности измерения псевдодальности в корреляционном приемнике. **Целью работы** является разработка методик оценки погрешности измерения псевдодальности навигационной аппаратурой потребителей СРНС, работающей в одночастотном, двухчастотном или дифференциальном режимах, в условиях возмущений ионосферы, сопровождаемых одновременным образованием неоднородностей различных масштабов (крупных, средних и мелких). **Новизна** заключается в теоретическом обобщении моделей и методов, применяемых для оценки ионосферной погрешности измерения псевдодальности навигационной аппаратурой потребителей СРНС в условиях образования крупно- и среднемасштабных неоднородностей, и оценки шумовой погрешности измерения псевдодальности в условиях образования интенсивных мелкомасштабных неоднородностей. **Результат:** получены аналитические зависимости погрешности измерения псевдодальности в навигационной аппаратуре потребителей СРНС от частотных параметров передаваемых сигналов СРНС (несущей частоты и полосы спектра), отношения сигнал/шум на входе измерительного приемника и среднеквадратического отклонения мелкомасштабных флуктуаций полного электронного содержания ионосферы относительно их среднего значения (учитывающего крупно- и среднемасштабные неоднородности). **Практическая значимость:** получены результаты прогнозирования роста погрешностей измерений псевдодальности в навигационной аппаратуре потребителей СРНС, работающей в различных режимах (одночастотном, двухчастотном и дифференциальном), в условиях естественных возмущений ионосферы в области полярных и экваториальных широт и искусственных (техногенных) возмущений ионосферы, сопровождающихся образованием интенсивных мелкомасштабных неоднородностей ионосферы. Показано, что в последнем случае погрешность определения псевдодальности может достигать значений 35...384 м и будет иметь место при использовании в СРНС сигналов с широкой полосой спектра (10 МГц) и двухчастотного режима работы навигационной аппаратуры потребителей, которые традиционно используются для уменьшения шумовой и ионосферной составляющих погрешности измерения псевдодальности.

Ключевые слова: спутниковая радионавигационная система, беспилотный летательный аппарат, полное электронное содержание ионосферы, мелкомасштабные флуктуации, частотно-селективные замирания, погрешность измерения псевдодальности.

Библиографическая ссылка на статью:

Пашинцев В. П., Линец Г. И., Коваль С. А., Сенокосов М. А., Мельников С. В. Погрешность определения псевдодальности в спутниковой радионавигационной системе при возмущениях ионосферы // Системы управления, связи и безопасности. 2020. № 2. С. 231-279. DOI: 10.24411/2410-9916-2020-10208.

Reference for citation:

Pashintsev V. P., Linets G. I., Koval S. A., Senokosov M. A., Melnikov C. V. The Error in Determining the Pseudorange in the Global Navigation Satellite System with Disturbances in the Ionosphere. *Systems of Control, Communication and Security*, 2020, no. 2, pp. 231-279 (in Russian). DOI: 10.24411/2410-9916-2020-10208.

Введение

В настоящее время широкое применение для решения различных задач в арктических широтах находят беспилотные летательные аппараты (БЛА) [1]. Погрешность позиционирования БЛА определяется бортовым приемником навигационной аппаратуры потребителей (НАП) спутниковой радионавигационной системы (СРНС) ГЛОНАСС или GPS (Global Positioning System), которая обеспечивает точность расчета координат на порядок выше, чем инерциальная навигационная система [1, 2]. Недостатком применения СРНС является снижение точности определения координат в арктических широтах. Согласно [3] в этих условиях погрешность местоопределения БЛА может возрасти до 10 и более метров по причине образования в ионосфере крупномасштабных неоднородностей с частотой флуктуаций $f_{\phi} \approx 4$ МГц, что примерно соответствует их пространственному масштабу $l \approx 125$ км.

Известно [4], что при перемещении крупномасштабных неоднородностей в ионосфере непрерывно образуются неоднородности более мелких масштабов. Поэтому при естественных возмущениях ионосферы в области арктических (и экваториальных) широт, помимо крупномасштабных ($l > 100$ км), могут возникать неоднородности среднемасштабные ($l \sim 1 \dots 100$ км) и мелкомасштабные ($l \sim 100 \dots 1000$ м) [5-7]. Подобного рода неоднородности различных масштабов могут возникать и при искусственных (техногенных) возмущениях ионосферы путем ее радионагрева, инъекции легкоионизирующихся химических веществ (типа бария), работы двигателей ракет в ионосфере, взрывов и т.д. [5, 6]. При этом наиболее пагубное влияние на точность местоопределения БЛА с помощью НАП СРНС оказывают не крупно- и среднемасштабные, а мелкомасштабные неоднородности ионосферы в силу следующих причин.

Известно [4, 8-11], что в области полярных и экваториальных широт часто наблюдается существенное снижение показателей качества СРНС и систем спутниковой связи (ССС) по причине возникновения интенсивных флуктуаций амплитуды принимаемых сигналов (или мерцаний, замираний, сцинтилляций). Эти флуктуации обусловлены образованием мелкомасштабных (с размерами порядка 100...1000 м) неоднородностей ионосферы и рассеянием (дифракцией) радиоволн на этих неоднородностях, что обуславливает их многолучевое распространение в трансionoсферном канале. В условиях искусственных возмущений ионосферы путем выброса бария интенсивность мелкомасштабных неоднородностей может возрасти настолько, что полоса когерентности трансionoсферного канала передачи сигналов на несущей частоте $f_0 = 1,6$ ГГц может сжаться до значений $\Delta F_k < 1$ МГц [12-14]. Поэтому при традиционных значениях ширины спектра используемых в СРНС сигналов ($\Delta F_0 = 1$ МГц или 10 МГц) может выполняться условие $\Delta F_0 \geq \Delta F_k$ возникновения частотно-селективных замираний (ЧСЗ) в трансionoсферном канале. Поскольку ЧСЗ характеризуются флуктуациями (искажениями) формы огибающей принимаемых сигналов, то в корреляционном приемнике сигналов будут возникать энергетические потери, которые приводят к увеличению вероятности ошибки в системах спутниковой связи [13], а также погрешности измерения псевдодальности

(δR) в СРНС, определяющей погрешность измерения координат ($\delta x = (1,5...3)\delta R$).

В настоящее время при проектировании СРНС учитывается негативное влияние на величину δR регулярных возмущений ионосферы и ее крупно- и среднemasштабных неоднородностей [5, 6, 15-17]. Для устранения ионосферной составляющей погрешности измерения псевдодалности используются двухчастотный ($f_{02}=1,6$ ГГц и $f_{01}=1,2$ ГГц) и дифференциальный режимы работы СРНС. Однако эти режимы работы сопровождаются увеличением шумовой составляющей δR в 2...3 раза. Поэтому для ее уменьшения в СРНС реализуют очень высокое энергетическое отношение сигнал/шум $E_r/N_0 = 35...48$ дБ на входе измерительного приемника, а в двухчастотном режиме работы СРНС используют передачу фазоманипулированных шумоподобных сигналов (ФМ ШПС) с широкой полосой спектра $\Delta F_0 = \Delta F_{0ш} = 10$ МГц, вместо ФМ ШПС с узкой полосой $\Delta F_0 = \Delta F_{0y} = 1$ МГц [16]. Однако применение таких сигналов в условиях возмущений ионосферы, сопровождаемых образованием интенсивных мелкомасштабных неоднородностей, приводит к возможности выполнения условия возникновения ЧСЗ ($\Delta F_{0ш} \geq \Delta F_k$) и существенному возрастанию погрешности измерения псевдодалности (δR).

Поэтому вопросы оценки погрешности измерения псевдодалности в НАП СРНС, работающих в различных режимах (одночастотном, двухчастотном и дифференциальном), в условиях возмущений ионосферы, сопровождаемых одновременным образованием неоднородностей различных масштабов (крупных, средних и мелких), является актуальными.

В настоящее время для мониторинга ионосферы и исследования ее влияния на процесс распространения радиоволн широко используются специализированные двухчастотные GISTM-приемники (GISTM – GNSS Ionospheric Scintillation and TEC Monitor), позволяющие помимо решения навигационной задачи определять полное электронное содержание (ПЭС) ионосферы (N_T) по сигналам спутниковых радионавигационных систем ГЛОНАСС/GPS [5, 7, 18, 19]. Наиболее совершенный GISTM-приемник типа NovAtel GPStation-6 способен измерять ПЭС ионосферы на трассах распространения радиоволн от навигационных космических аппаратов (НКА) до НАП и определять его статистические характеристики: среднеквадратическое отклонение $\sigma_{\Delta N_T}$ мелкомасштабных флуктуаций ПЭС относительно среднего значения $\overline{N_T}$ (учитывающего вариации крупных и средних масштабов) [18, 20]. По результатам мониторинга $\sigma_{\Delta N_T}$ открывается возможность определения полосы когерентности трансionoсферного канала $\Delta F_k \sim f_0/\sigma_{\Delta N_T}$ [21].

Целью статьи является разработка методик оценки погрешности измерения псевдодалности в навигационной аппаратуре потребителей СРНС, работающей в различных режимах (одночастотном, двухчастотном и дифференциальном), в условиях возмущений ионосферы, сопровождаемых одновременным

образованием неоднородностей различных масштабов (крупных, средних и мелких).

В результате разработки методики должны быть установлены аналитические зависимости $\delta R = \psi(f_{01}, f_{02}, F_{0y}, F_{0ш}, E_r/N_0, \sigma_{\Delta N_T}, \overline{N_T})$ погрешности измерения псевдодальности в НАП СРНС от частотных параметров передаваемых сигналов СРНС (несущих частот f_{02}, f_{01} и полос спектра $F_{0y}, F_{0ш}$), отношения сигнал/шум (E_r/N_0) на входе измерительного приемника и статистических характеристик полного электронного содержания ионосферы (среднеквадратического отклонения мелкомасштабных флуктуаций $\sigma_{\Delta N_T}$ относительно среднего значения $\overline{N_T}$).

Для достижения цели представляется необходимым постановка ряда частных задач, решение которых представлено далее в виде отдельных подразделов:

- 1) проведения качественного анализа влияния неоднородностей ионосферы различных масштабов на погрешность определения псевдодальности одночастотной НАП СРНС;
- 2) разработки методики оценки влияния мелкомасштабных неоднородностей ионосферы на погрешность определения псевдодальности одночастотной НАП СРНС;
- 3) разработки методики оценки влияния мелкомасштабных неоднородностей ионосферы на погрешность определения псевдодальности двухчастотной НАП СРНС;
- 4) разработки методики оценки влияния мелкомасштабных неоднородностей ионосферы на погрешность определения псевдодальности одночастотной НАП СРНС на БЛА в дифференциальном режиме работы;
- 5) прогнозирования увеличения погрешностей измерений псевдодальности в НАП СРНС, работающей в различных режимах (одночастотном, двухчастотном и дифференциальном), в условиях возмущений ионосферы.

1. Качественный анализ влияния неоднородностей ионосферы различных масштабов на погрешность определения псевдодальности одночастотной НАП СРНС

Известно [15-17], что погрешность определения координат в одночастотной ($f_0 = f_{02} = 1,6$ ГГц) НАП СРНС $\delta x = \Gamma \delta R$ зависит от геометрического фактора Γ (обычно $\Gamma = 1,5 \dots 3$) и погрешности измерения псевдодальности δR_i до каждого из четырех ($i=1 \dots 4$) навигационных космических аппаратов (НКА), входящих в созвездие. Погрешность измерения псевдодальности δR до любого НКА зависит от погрешностей измерения задержки времени распространения сигнала $\delta \tau = \delta R/c$ (со скоростью света $c = 3 \cdot 10^8$ м/с) и определяется суммой нескольких составляющих

$$\begin{aligned} \delta R &= \delta R_i + \delta R_T + \delta R_{мл} + \delta R_{ш} + \delta R_{шв} + \delta R_{др} = \\ &= c \delta \tau = c(\delta \tau_i + \delta \tau_T + \delta \tau_{мл} + \delta \tau_{ш} + \delta \tau_{шв} + \delta \tau_{др}), \end{aligned} \quad (1)$$

обусловленных различными причинами: влиянием ионосферы ($\delta R_{\text{и}} = c\delta\tau_{\text{и}} = 2...45$ м), тропосферы ($\delta R_{\text{т}} = c\delta\tau_{\text{т}} = 0,25...2$ м), многолучевости ($\delta R_{\text{мл}} = c\delta\tau_{\text{мл}} \approx 3...9$ м), шумов приемника ($\delta R_{\text{ш}} = c\delta\tau_{\text{ш}} \approx 2...6$ м), смещением шкал времени ($\delta R_{\text{шв}} = c\delta\tau_{\text{шв}} = 1...2$ м) и ряда других факторов ($\delta R_{\text{др}} = c\delta\tau_{\text{др}}$).

Анализ бюджета погрешностей определения псевдодальностей (1) показывает [15-17], что основной вклад вносят составляющие, обусловленные влиянием ионосферы $\delta R_{\text{и}}$, многолучевости $\delta R_{\text{мл}}$ и шумов приемника $\delta R_{\text{ш}}$. При размещении НАП СРНС на БЛА влияние многолучевого переотражения радиоволн от Земли практически устраняется ($\delta R_{\text{мл}} \approx 0$). Поэтому в первом приближении можно считать, что погрешность определения псевдодальности (1) до НКА при размещении НАП СРНС на БЛА определяется ее ионосферной $\delta R_{\text{и}} \approx 2...45$ м и шумовой $\delta R_{\text{ш}} \approx 2...6$ м составляющими: $\delta R \approx \delta R_{\text{и}} + \delta R_{\text{ш}} \approx 4...51$ м.

Для уменьшения или устранения ионосферной составляющей определения псевдодальности НАП СРНС ($\delta R_{\text{и}} \rightarrow 0$) на БЛА можно использовать режим работы на двух несущих частотах ($f_{01} \approx 1,2$ ГГц и $f_{02} \approx 1,6$ ГГц) или одночастотный ($f_0 = f_{02} \approx 1,6$ ГГц) дифференциальный режим работы с применением опорно-измерительной станции [15-17].

В дифференциальном режиме работы НАП СРНС на БЛА ионосферная составляющая погрешности определения псевдодальности практически устраняется ($\delta R_{\text{и}} \approx 0$), но в 2 раза возрастают шумовая погрешность (т.е. до $\delta R_{\text{ш}} \approx 4...12$ м) и возникают погрешности многолучевости ($\delta R_{\text{мл}} \approx 3$ м), обусловленные наземной опорно-измерительной станцией. Поэтому в первом приближении можно считать, что погрешность определения псевдодальности (1) до НКА при размещении НАП СРНС на БЛА в дифференциальном режиме работы определяется ее шумовой и многолучевой составляющей и снижается до $\delta R \approx \delta R_{\text{ш}} + \delta R_{\text{мл}} \approx 7...15$ м.

В двухчастотном режиме работы СРНС ионосферная составляющая погрешности определения псевдодальности практически устраняется ($\delta R_{\text{и}} \approx 0$), но существенно (в 3 раза) возрастают шумовые погрешности (т.е. до $\delta R_{\text{ш}} \approx 6...18$ м). Для снижения шумовых погрешностей определения псевдодальностей в СРНС предусмотрена возможность применения на каждой из несущих частот (f_{01}, f_{02}) двухкомпонентных фазоманипулированных шумоподобных сигналов (ФМ ШШС), отличающихся шириной спектра: узкой $\Delta F_{0y} \approx 1$ МГц и широкой $\Delta F_{0ш} \approx 10$ МГц. Применение широкополосного ФМ ШШС (с $\Delta F_{0ш} \approx 10$ МГц) позволяет в 10 раз уменьшить шумовую погрешность определения псевдодальности (т.е. до $\delta R_{\text{ш}} \approx 0,6...1,8$ м). Поэтому применение в СРНС двухчастотного ($f_{01} \approx 1,2$ ГГц и $f_{02} \approx 1,6$ ГГц) режима работы с широкополосными сигналами ($\Delta F_{02} \approx 10$ МГц) позволит существенно уменьшить погрешность определения псевдодальности (до $\delta R \approx \delta R_{\text{и}} + \delta R_{\text{ш}} \approx \delta R_{\text{ш}} \approx 0,6...1,8$ м)

и обеспечить погрешность определения координат БЛА (при $\Gamma = 1,5 \dots 3$) в пределах нескольких метров ($\delta x = \Gamma \delta R \approx 1 \dots 5$ м).

Однако указанные возможности снижения погрешности определения псевдодальности и координат НАП СРНС за счет уменьшения ионосферной составляющей в двухчастотном или дифференциальном режимах работы обеспечиваются только в условиях нормальной среднеширотной ионосферы. В условиях естественных возмущений ионосферы (в области арктических или экваториальных широт) или искусственных ее возмущениях (например, при инъекции легкоионизирующихся веществ) образуются неоднородности различных масштабов: от крупных ($l \sim 100$ км) до мелких $l \sim 100$ м). При этом известно [13, 12], что образование интенсивных мелкомасштабных неоднородностей ионосферы может вызывать ЧЗ принимаемых сигналов (особенно при использовании ФМ ШШС с широкой полосой спектра $\Delta F_{\text{ош}} \approx 10$ МГц) и существенное возрастание (на порядок и более) шумовой погрешности измерения времени запаздывания $\delta \tau_{\text{ш}}$ и псевдодальности $\delta R_{\text{ш}} = c \delta \tau_{\text{ш}}$ до НКА СРНС.

Поэтому актуальной задачей является разработка методики оценки влияния мелкомасштабных и более крупных неоднородностей ионосферы на погрешность определения координат НАП СРНС на БЛА в различных режимах работы.

Традиционно [15-17, 22] при описании модели ионосферы в задачах навигации и связи учитывают изменение электронной концентрации $N(h)$ по высоте h в различных слоях (D, E, F) без учета горизонтальных $\rho = (x, y)$ неоднородностей. Известно [4-7], что в условиях арктических и экваториальных широт часто наблюдаются перемещающиеся ионосферные возмущения, сопровождаемые одновременным образованием неоднородностей электронной концентрации (ЭК) различных масштабов [6]: крупных ($\rho = 600 \dots 1200$ км), средних ($\rho = 1 \dots 600$ км), мелких ($\rho = 0,1 \dots 1$ км). Следовательно, модель изменения ЭК в ионосфере по пространству $N(h, \rho)$ должна учитывать отклонения неоднородностей $\Delta N(h, \rho)$ различных масштабов относительно среднего значения $\bar{N}(h)$, описывающего изменения ЭК только по высоте:

$$N(h, \rho) = \bar{N}(h) + \Delta N_{\text{к}}(h, \rho) + \Delta N_{\text{с}}(h, \rho) + \Delta N_{\text{м}}(h, \rho), \quad (2)$$

где $\Delta N_{\text{к}}(h, \rho)$ и $\Delta N_{\text{с}}(h, \rho)$ – крупномасштабные и среднемасштабные неоднородности, $\Delta N_{\text{м}}(h, \rho)$ – мелкомасштабные неоднородности ЭК.

На рис. 1 показана модель ионосферы, которая описывает: 1) типовую зависимость ЭК от высоты $N(h) \equiv \bar{N}(h)$ в слоях (D, E, F) среднеширотной ионосферы, которая не изменяется (т.е. однородна) по горизонтальным координатам $\rho = (x, y)$; 2) изменение ЭК по пространству (h, ρ) с учетом крупномасштабных отклонений $\Delta N_{\text{к}}(h, \rho)$ относительно фона $\bar{N}(h)$: $\bar{N}(h) + \Delta N_{\text{к}}(h, \rho)$; 3) изменение по пространству ЭК учетом суммы крупно- и среднемасштабных отклонений $\bar{N}(h) + \Delta N_{\text{к}}(h, \rho) + \Delta N_{\text{с}}(h, \rho) = \bar{N}(h, \rho)$;

4) изменение по пространству ЭК ионосферы с учетом мелкомасштабных $\Delta N_M(h, \rho)$ флуктуаций относительно среднего значения $\bar{N}(h, \rho)$.

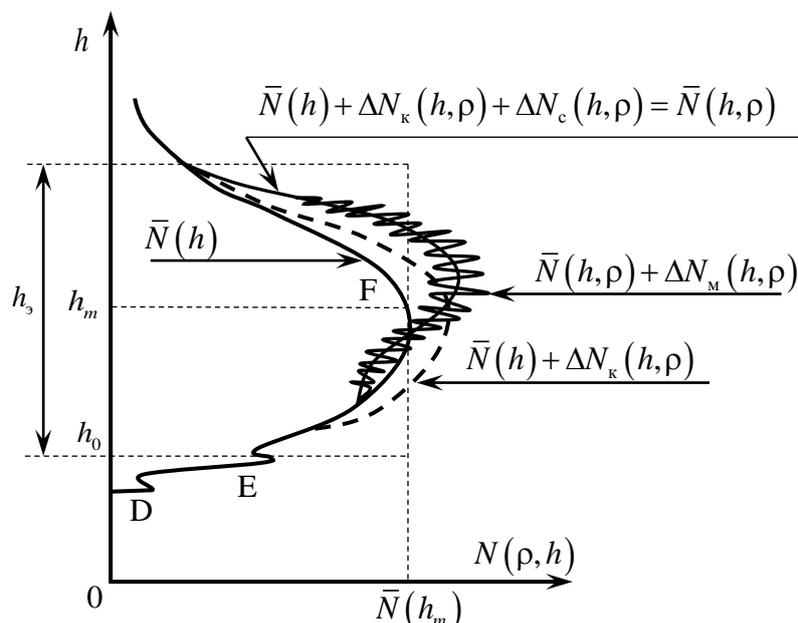


Рис. 1. Модель ионосферы с учетом изменения в пространстве электронной концентрации в неоднородностях крупного, среднего и мелкого масштабов

Известно [15, 16], что ионосферная составляющая погрешности определения псевдодальности до НКА в условиях среднеширотной нормальной ионосферы описывается выражением, которое учитывает изменение ЭК в слоях ионосферы только по высоте $N(h) \equiv \bar{N}(h)$:

$$\begin{aligned} \delta R_{\text{и}} &= c \cdot \delta \tau_{\text{и}} = c \left(40,3 N_T \sec \alpha / c f_0^2 \right) = 40,3 f_0^{-2} \sec \alpha \int_0^{h_{\text{НКА}}} N(h) dh \equiv \\ &\equiv 40,3 f_0^{-2} \sec \alpha \int_0^{h_{\text{НКА}}} \bar{N}(h) dh = 40,3 f_0^{-2} \bar{N}(h_m) h_3 \sec \alpha = 40,3 \frac{\bar{N}_T \sec \alpha}{f_0^2}, \end{aligned} \quad (3)$$

где 40,3 – коэффициент, имеющий размерность $[м^3/с^2]$ (в некоторых источниках [11, 17] этот коэффициент принимается равным 40,4);

$$N_T = \int_0^{h_{\text{НКА}}} N(h) dh = N(h_m) h_3 \equiv \int_0^{h_{\text{НКА}}} \bar{N}(h) dh = \bar{N}(h_m) h_3 = \bar{N}_T \quad (4)$$

– среднее значение полного электронного содержания (ПЭС) ионосферы на трассе от НКА (на высоте $h_{\text{НКА}} \approx 20000$ км) до приемника НАП (без учета неоднородностей ЭК); $N(h) \equiv \bar{N}(h)$ – изменение по высоте h электронной концентрации в однородной ионосфере; h_3 – эквивалентная толщина ионосферы (400...500 км) с ЭК, равной ее максимальному значению $N(h_m) \equiv \bar{N}(h_m)$ на высоте $h = h_m = 300...400$ км максимума ионизации; α – зенитный угол распространения радиоволн (РРВ), f_0 – несущая частота [Гц].

В средних широтах происходят регулярные изменения ПЭС ионосферы. В наихудших условиях (зимний день в годы максимальной солнечной активности), когда максимальная ЭК достигает значения $\bar{N}(h_m) \approx 2,4 \cdot 10^{12}$ эл/м³ и величина ПЭС составляет $\bar{N}_T \approx 10^{18}$ эл/м² = 100 TECU (где 1 TECU = 10¹⁶ эл/м²), ионосферная составляющая погрешности измерения псевдодальности на несущей частоте $f_0 = 1,6$ ГГц при вертикальном РРВ $\alpha = 0^\circ$ (когда $\sec \alpha = 1$) достигает $\delta R_{\text{и}} \approx 15$ м [16]. При больших углах РРВ $\alpha \approx 70^\circ$, когда $\sec \alpha \approx 3$, ионосферная составляющая погрешности измерения псевдодальности на несущей частоте $f_0 = 1,6$ ГГц возрастает до $\delta R_{\text{и}} \approx 45$ м.

Усредненные по всем сезонам значения ПЭС составляют $N_T \approx 10^{17}$ эл/м² = 10 TECU ночью и $N_T \approx 5 \cdot 10^{17}$ эл/м² = 50 TECU днем [23]. Поэтому в среднем можно считать, что ионосферная составляющая погрешности определения псевдодальности до НКА при $\alpha = 0^\circ$ составляет $\delta R_{\text{и}} = 40,3 N_T \sec \alpha / f_0^2 \approx 1,5$ м днем и $\delta R_{\text{и}} \approx 7,5$ м ночью.

В соответствии с выражениями (2) и (4) пространственные изменения ПЭС в неоднородной ионосфере определяются как

$$\begin{aligned} N_T(\rho) &= \int_0^{h_{\text{НКА}}} N(h, \rho) dh = \int_0^{h_{\text{НКА}}} \bar{N}(h) dh + \\ &+ \int_0^{h_{\text{НКА}}} \Delta N_{\text{к}}(h, \rho) dh + \int_0^{h_{\text{НКА}}} \Delta N_{\text{с}}(h, \rho) dh + \int_0^{h_{\text{НКА}}} \Delta N_{\text{м}}(h, \rho) dh = \\ &= \bar{N}_T + \Delta N_{\text{Тк}}(\rho) + \Delta N_{\text{Тс}}(\rho) + \Delta N_{\text{Тм}}(\rho) = \bar{N}_T(\rho) + \Delta N_{\text{Тм}}(\rho), \end{aligned} \quad (5)$$

где $\Delta N_{\text{Тм}}(\rho) \sim \Delta N_{\text{м}}(h, \rho)$ – мелкомасштабные флуктуации ПЭС по горизонтальным координатам $\rho = (x, y)$ относительно среднего (фонового) значения $\bar{N}_T(\rho) = \bar{N}_T + \Delta N_{\text{Тк}}(\rho) + \Delta N_{\text{Тс}}(\rho)$, учитывающего крупно- и среднемасштабные неоднородности ЭК.

Чтобы оценить погрешность определения псевдодальности $\delta R \approx \delta R_{\text{и}} + \delta R_{\text{ш}}$ и координат НАП СРНС $\delta x = \Gamma \delta R \approx \Gamma(\delta R_{\text{и}} + \delta R_{\text{ш}})$ с учетом влияния ПЭС ионосферы с неоднородностями крупных, средних и мелких масштабов (5), проанализируем модель процесса РРВ от одного из НКА (например, НКА №1) через ионосферу до одночастотной НАП СРНС и особенности обработки принимаемых сигналов (рис.2).

Пусть передаваемый с НКА №1 сигнал с комплексной огибающей $\dot{S}_i(t)$, энергией E_i и несущей частотой $f_0 = \omega_0/2\pi$ описывается выражением вида [24]

$$s_i(t) = \sqrt{2} \operatorname{Re}(\dot{S}_i(t) \exp(j\omega_0 t)) = \sqrt{2} \operatorname{Re}(\sqrt{E_i} \dot{f}(t) \exp(j\omega_0 t)), \quad (6)$$

где $\dot{f}(t) = \dot{S}_i(t) / \sqrt{E_i}$ – нормированная комплексная огибающая.

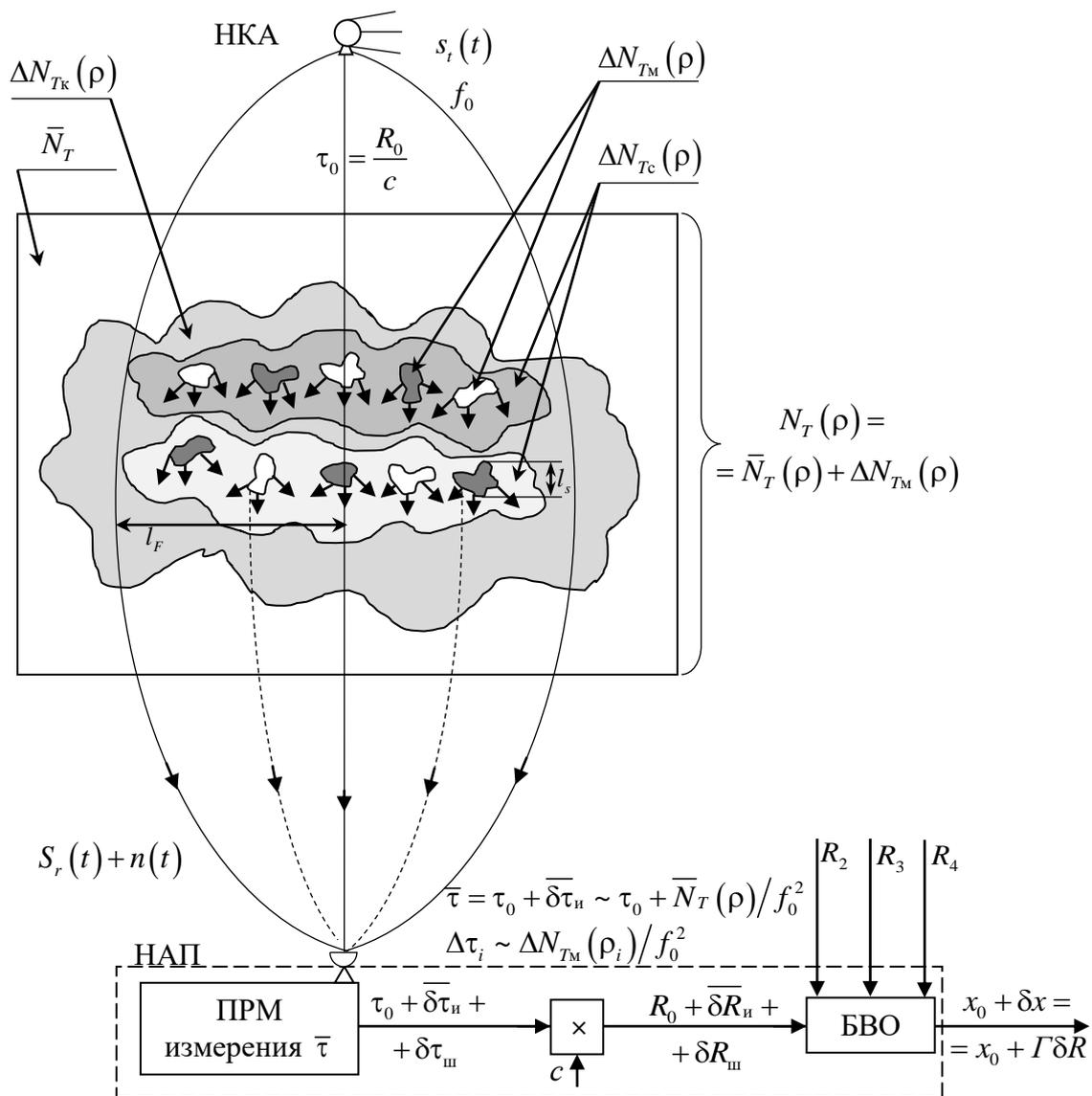


Рис. 2. Модель процесса распространения радиоволн через ионосферу в СРНС с учетом влияния неоднородностей крупного, среднего и мелкого масштабов

Очевидно, что в отсутствие неоднородностей ионосферы, когда в соответствии с (5) $\Delta N_{Tk}(\rho) = \Delta N_{Tc}(\rho) = \Delta N_{Tm}(\rho) = 0$ и $\bar{N}_T(\rho) = \bar{N}_T$, время распространения сигнала от НКА до приемника НАП на расстоянии $R_0 = c\tau_0$ возрастает на величину ионосферной погрешности $\delta\tau_n$ и определяется в соответствии с (3) как

$$\tau = \tau_0 + \delta\tau_n = \tau_0 + 40,3\bar{N}_T \sec \alpha / cf_0^2. \quad (7)$$

Напомним, что согласно [5, 6] мелкомасштабные неоднородности ЭК имеют размеры $\rho = 0,1 \dots 1$ км. Однако с точки зрения условий трансionoсферного РРВ удобнее считать мелкомасштабными такие неоднородности ЭК, размеры которых ($\rho \equiv l$) не превышают первой зоны Френеля $l \leq l_F$. Для СРНС она примерно равна $l_F \approx \sqrt{h_m \lambda_0} = \sqrt{h_m c / f_0} \approx 200 \dots 400$ м. Очевидно, что наличие неоднородностей с размерами больше зоны Френеля $l > l_F$ (т.е. крупно- и среднemasштабных) обуславливает дополнительную (по сравнению с $\delta\tau_n \sim \bar{N}_T$) за-

держку времени распространения всех участков фронта волны в ионосфере $\Delta\tau_{\text{и}} \sim (\Delta N_{T_{\text{к}}}(\rho) + \Delta N_{T_{\text{с}}}(\rho))$.

Поэтому входящее в (5) среднее значение ПЭС ионосферы с учетом крупно- и среднemasштабных неоднородностей $\overline{N_T}(\rho) = \overline{N_T} + \Delta N_{T_{\text{к}}}(\rho) + \Delta N_{T_{\text{с}}}(\rho)$ определяет среднее время распространения сигнала от НКА до НАП СРНС

$$\begin{aligned} \overline{\tau} &= \tau_0 + 40,3 \overline{N_T}(\rho) \sec \alpha / c f_0^2 = \\ &= \tau_0 + 40,3 \left(\overline{N_T} + \Delta N_{T_{\text{к}}}(\rho) + \Delta N_{T_{\text{с}}}(\rho) \right) \sec \alpha / c f_0^2 = \tau_0 + \overline{\delta\tau_{\text{и}}}, \end{aligned} \quad (8)$$

где

$$\overline{\delta\tau_{\text{и}}} = 40,3 \left(\overline{N_T} + \Delta N_{T_{\text{к}}}(\rho) + \Delta N_{T_{\text{с}}}(\rho) \right) \sec \alpha / c f_0^2 = \delta\tau_{\text{и}} + \Delta\tau_{\text{и к}} + \Delta\tau_{\text{и с}}$$

– среднее значение ионосферной погрешности времени запаздывания с учетом крупномасштабных ($\Delta\tau_{\text{и к}}$) и среднemasштабных ($\Delta\tau_{\text{и с}}$) неоднородностей ионосферы.

Наличие мелкомасштабных пространственных ($\rho = \rho_i$) флуктуаций ПЭС ионосферы $\Delta N_{T_{\text{м}}}(\rho) \equiv \Delta N_T(\rho_i)$ определяет появление относительных фазовых сдвигов различных участков (ρ_i) фронта распространяющейся волны (лучей) в точку приема сигналов [11]

$$\begin{aligned} \Delta\phi_i &= \omega_0 \Delta\tau_i = 2\pi f_0 \Delta\tau_i = 80,6\pi \Delta N_{T_{\text{м}}}(\rho) \sec \alpha / c f_0 \equiv \\ &\equiv 80,6\pi \Delta N_T(\rho_i) \sec \alpha / c f_0 \end{aligned} \quad (9)$$

и относительное время запаздывания этих лучей

$$\begin{aligned} \Delta\tau_i &= \Delta\phi_i / 2\pi f_0 \equiv \Delta\tau(\rho_i) = 40,3 \Delta N_{T_{\text{м}}}(\rho) \sec \alpha / c f_0^2 \equiv \\ &\equiv 40,3 \Delta N_T(\rho_i) \sec \alpha / c f_0^2. \end{aligned} \quad (10)$$

Согласно [11, 24, 25] соотношения между $\Delta\tau_i$ и значениями несущей частоты f_0 и ширины спектра ΔF_0 передаваемого сигнала определяют условия возникновения интерференционных замираний принимаемых сигналов различных типов. При выполнении соотношения $\Delta\tau_i \ll 1/f_0$ возникают общие (неселективные) замирания райсовского типа, а при $1/f_0 \ll \Delta\tau_i \ll 1/\Delta F_0$ – рэлеевского типа. Последнее соотношение ($\Delta\tau_i \ll 1/F_0$) отражает условие отсутствия ЧСЗ принимаемых сигналов, которое можно записать в более наглядном виде $\Delta F_0 \ll 1/\Delta\tau_i \approx \Delta F_{\text{к}}$, где $\Delta F_{\text{к}} \approx 1/\Delta\tau_i$ – полоса когерентности (неискаженной передачи) радиоканала. Если ширина спектра передаваемого сигнала превосходит полосу когерентности канала $\Delta F_0 \geq \Delta F_{\text{к}} \approx 1/\Delta\tau_i$, то принимаемые сигналы будут подвержены ЧСЗ, которые сопровождаются не только флуктуациями амплитуды и фазы принимаемого сигнала, но и случайными искажениями формы его огибающей.

Очевидно, что по мере возрастания мелкомасштабных флуктуаций ПЭС $\Delta N_{T_{\text{м}}}(\rho) \equiv \Delta N_T(\rho_i)$ в ионосфере будут возрастать относительные запаздывания приходящих лучей (10) $\Delta\tau_i \sim \Delta N_T(\rho_i) / f_0^2 \equiv \Delta N_{T_{\text{м}}}(\rho) / f_0^2$ в трансionoсферном радиоканале (рис. 2), что приведет к выполнению условий возникновения сначала

райсовских замираний ($\Delta\tau_i \ll 1/f_0$), потом – рэлеевских ($1/f_0 \ll \Delta\tau_i \ll 1/\Delta F_0$), а затем – ЧСЗ ($\Delta F_0 \geq \Delta F_k \approx 1/\Delta\tau_i$) принимаемых сигналов.

В соответствии с выражениями (8-10) при выполнении условия возникновения ЧСЗ в транссионосферном радиоканале

$$\Delta F_0 \geq \Delta F_k \approx 1/\Delta\tau_i = c f_0^2 / 40,3 \Delta N_T(\rho_i) \sec \alpha \quad (11)$$

сигнал на входе приемника НАП СРНС описывается выражением вида [11]

$$\begin{aligned} s_r(t) &= \sqrt{2} \operatorname{Re} \left\{ \dot{S}_r(t) \exp(j\omega_0(t - \bar{\tau})) \right\} = \\ &= \sqrt{2} \operatorname{Re} \left\{ \sqrt{E_t} \int_{-\infty}^{\infty} \dot{b}(\Delta\tau) \dot{f}(t - \bar{\tau} - \Delta\tau) d\Delta\tau \exp(j\omega_0(t - \bar{\tau})) \right\}, \end{aligned} \quad (12)$$

где $\bar{\tau}$ – среднее время запаздывания принимаемого сигнала определяется согласно (8);

$$\dot{S}_r(t) = \sqrt{E_t} \int_{-\infty}^{\infty} \dot{b}(\Delta\tau) \dot{f}(t - \bar{\tau} - \Delta\tau) d\Delta\tau \quad (12a)$$

– комплексная огибающая принимаемого сигнала, которая определяется комплексной низкочастотной импульсной функцией $\dot{b}(\Delta\tau)$ канала. Последняя связана преобразованием Фурье

$$\dot{b}(\Delta\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} \dot{K}(\omega) \exp(j\Omega\Delta\tau) d\omega / 2\pi \quad (13)$$

с комплексной передаточной функцией $\dot{K}(\omega)$ транссионосферного канала на частоте $\omega = \omega_0 + \Omega = 2\pi(f_0 + F)$ в пределах ширины спектра сигнала $\pm F_0 = 2F_0 = \Delta F_0$. Она зависит от флуктуаций времени запаздывания приходящих лучей (10) $\Delta\tau(\rho_i) \sim \Delta N_T(\rho_i) / f_0^2$ относительно их среднего значения $\bar{\tau}$ как [11]

$$\begin{aligned} \dot{K}(\omega) &= \sqrt{K_{oc}} \sum_{i=1}^M \exp(-j(\omega_0 + \Omega)\Delta\tau(\rho_i)) = \\ &= \sqrt{K_{oc}} \sum_{i=1}^M \exp(-j80,6\pi(f_0 + F)\Delta N_T(\rho_i) \sec \alpha / c f_0^2), \end{aligned} \quad (14)$$

где $\sqrt{K_{oc}}$ – коэффициент ослабления по амплитуде (одинаковый для всех ($i=1\dots M$) приходящих лучей) в транссионосферном канале (обусловленный влиянием свободного пространства и теплового поглощения волны в ионосфере).

Средняя мощность принимаемого сигнала (12) с ЧСЗ определяется с использованием его комплексно-сопряженной функции $\dot{S}_r^*(t)$ как [11]

$$\bar{P}_r(t) = \overline{\dot{S}_r^*(t) \cdot \dot{S}_r(t)} = E_t \int_{-\infty}^{\infty} \left| \dot{f}(t - \bar{\tau} - \Delta\tau) \right|^2 \sigma(\Delta\tau) d\Delta\tau, \quad (15)$$

где $\sigma(\tau)$ – функция рассеяния канала по времени запаздывания лучей, определяемая как

$$\sigma(\Delta\tau) = \overline{\dot{b}(\Delta\tau) \dot{b}^*(\Delta\tau)} = \overline{|\dot{b}(\Delta\tau)|^2}. \quad (16)$$

Анализ выражений (16) и (13, 14) указывает на наличие зависимости $\sigma(\Delta\tau) = \psi(\Delta\tau(\rho_i) \approx 1/\Delta F_k)$ функции рассеяния транссионсферного канала от полосы его когерентности ΔF_k .

При выполнении условия возникновения рэлеевских замираний

$$1/f_0 \ll \Delta\tau_i \approx 40,3 \Delta N_T(\rho_i)/c f_0^2 \ll 1/\Delta F_0 \quad (17)$$

выражение (14) сводится к виду

$$\begin{aligned} \dot{K}(\omega) &= \sqrt{K_{oc}} \sum_{i=1}^M \exp(-j\omega_0 \Delta\tau(\rho_i)) \exp(-j2\pi F \Delta\tau(\rho_i)) \approx \\ &\approx \sqrt{K_{oc}} \sum_{i=1}^M \exp(-j\omega_0 \Delta\tau(\rho_i)) = \\ &= \sqrt{K_{oc}} \sum_{i=1}^M \exp(-j\omega_0 (40,3 \Delta N_T(\rho_i) \sec \alpha / c f_0^2)) = \dot{b}, \end{aligned} \quad (18)$$

где $\dot{b} = |\dot{b}| \exp(j\varphi_b)$ – комплексный случайный коэффициент передачи транссионсферного многолучевого радиоканала, зависящий от относительного запаздывания приходящих лучей (10) $\Delta\tau_i \equiv \Delta\tau(\rho_i) \sim \Delta N_T(\rho_i)/f_0^2$. В этом случае импульсная функция канала (13) принимает вид дельта-функции $\delta(\Delta\tau)$:

$$\begin{aligned} \dot{b}(\Delta\tau) &= \int_{-\infty}^{\infty} \dot{b} \exp(j\Omega \Delta\tau) d\omega / 2\pi = \\ &= \dot{b} \int_{-\infty}^{\infty} \exp(j(\omega - \omega_0) \Delta\tau) d\omega / 2\pi = \dot{b} \exp(-j\omega_0 \Delta\tau) \delta(\Delta\tau) \end{aligned}$$

и выражение (12) сводится к виду

$$\begin{aligned} s_r(t) &= \sqrt{2} \operatorname{Re} \left\{ \sqrt{E_t} \dot{b} \int_{-\infty}^{\infty} \dot{f}(t - \bar{\tau} - \Delta\tau) \times \right. \\ &\times \exp(-j\omega_0 \Delta\tau) \delta(\Delta\tau) d\Delta\tau \exp(j\omega_0(t - \bar{\tau})) \left. \right\} = \\ &= \sqrt{2} \operatorname{Re} \left\{ \sqrt{E_t} \dot{b} \dot{f}(t - \bar{\tau}) \exp(j\omega_0(t - \bar{\tau})) \right\} = \\ &= \sqrt{2} \operatorname{Re} \left\{ \dot{S}_r(t) \exp(j\omega_0 t') \right\}, \end{aligned} \quad (19)$$

где $t' = t - \bar{\tau}$. Средняя мощность принимаемого сигнала (19) с комплексной огибающей $\dot{S}_r(t) = \sqrt{E_t} \dot{b} \dot{f}(t - \bar{\tau})$ и рэлеевскими замираниями модуля $|\dot{b}|$ определяется как

$$\begin{aligned} \overline{P_r(t)} &= \overline{\dot{S}_r(t) \cdot \dot{S}_r^*(t)} = \overline{\sqrt{E_t} \dot{b} \dot{f}(t') \cdot \sqrt{E_t} \dot{b}^* \dot{f}^*(t')} = \\ &= E_t \overline{|\dot{b}|^2} |\dot{f}(t')|^2 = E_t K_{oc} |\dot{f}(t')|^2, \end{aligned} \quad (20)$$

где $\dot{b}^* = \left| \dot{b} \right| \exp(-j\varphi_b)$ – комплексно-сопряженная величина \dot{b} , а дисперсия модуля комплексного коэффициента передачи трансионосферного многолучевого ($i=1 \dots M$) радиоканала (18) соответствует его коэффициенту ослабления (K_{oc}) по мощности в отсутствие замираний:

$$\begin{aligned} \overline{|\dot{b}|^2} &= \overline{\dot{b} \cdot \dot{b}^*} = \\ &= \sqrt{K_{oc}} \sum_{i=1}^M \exp(-j\omega_0 \Delta\tau_r(\rho_i)) \cdot \sqrt{K_{oc}} \sum_{i=1}^M \exp(j\omega_0 \Delta\tau_r(\rho_i)) = K_{oc}. \end{aligned} \quad (21)$$

Средняя энергия сигнала с рэлеевскими замираниями (19) на входе приемника определяется через его среднюю мощность (20) и равна энергии принимаемого сигнала без замираний [24]

$$\bar{E}_r = \int_{-\infty}^{\infty} \bar{P}_r(t) dt = E_i K_{oc} \int_{-\infty}^{\infty} |\dot{f}(t')|^2 dt' = E_i K_{oc} = E_r, \quad (22)$$

в силу условия нормировки $\int_{-\infty}^{\infty} |\dot{f}(t)|^2 dt = 1$.

В частном случае отсутствия мелкомасштабных неоднородностей ионосферы $\Delta N_{TM}(\rho) \equiv \Delta N_T(\rho_i) = 0$ коэффициент передачи трансионосферного радиоканала (18) сводится к виду $\dot{b} = \sqrt{K_{oc}}$ для коэффициента ослабления сигнала по амплитуде (в свободном пространстве и поглощающих слоях ионосферы) и выражение для принимаемого сигнала (19) сводится к известному [24] виду

$$\begin{aligned} s_r(t) &= \sqrt{2} \operatorname{Re} \left\{ \dot{S}_r(t) \exp(j\omega_0(t - \bar{\tau})) \right\} = \\ &= \sqrt{2} \operatorname{Re} \left\{ \sqrt{E_i K_{oc}} \dot{f}(t - \bar{\tau}) \exp(j\omega_0(t - \bar{\tau})) \right\}, \end{aligned} \quad (23)$$

который отличается от передаваемого сигнала (6) ослаблением энергии E_i в K_{oc} раз и запаздыванием на время (8) $\bar{\tau} = \tau_0 + 40,3 \overline{N_T(\rho)} \sec \alpha / cf_0^2 = \tau_0 + \overline{\delta\tau_{и}}$.

Согласно рис. 2 в состав одночастотной НАП СРНС входит измерительный приемник (ПРМ) среднего времени запаздывания $\bar{\tau}$ сигнала $s_r(t)$, принимаемого с НКА №1 на несущей частоте $f_0 \approx 1,6$ ГГц, умножитель на скорость света (c) и блок вторичной обработки (БВО).

На вход измерительного приемника поступает аддитивная смесь принимаемого сигнала, описываемого выражениями (12), (19) или (23), и флуктуационной помехи $n(t)$ типа гауссовского белого шума (ГБШ), обусловленной наличием внутренних шумов ПРМ:

$$y(t) = s_r(t) + n(t) = \sqrt{2} \operatorname{Re} \left\{ \dot{S}_r(t) \exp(j\omega_0(t - \bar{\tau})) \right\} + n(t). \quad (24)$$

На выходе измерительного одночастотного приемника формируется оценка среднего времени запаздывания входного сигнала (8) и шумовая погрешность измерения запаздывания принимаемого сигнала:

$$\bar{\tau} + \delta\tau_{ш} = \tau_0 + \overline{\delta\tau_{и}} + \delta\tau_{ш} = \tau_0 + \delta\tau_{и} + \Delta\tau_{и\kappa} + \Delta\tau_{иc} + \delta\tau_{ш}. \quad (25)$$

Отсюда следует, что шумовая погрешность измерения запаздывания принимаемого сигнала $\delta\tau_{ш}$ должна зависеть от характеристик ГБШ ($n(t)$) и комплексной огибающей принимаемого сигнала $\dot{S}_r(t)$, которая согласно (12-16) и (17-19) зависит от соотношения между частотными параметрами передаваемых сигналов ($f_0, \Delta F_0$) и параметрами флуктуаций мелкомасштабных неоднородностей ионосферы $\Delta N_{ТМ}(\rho) \equiv \Delta N_T(\rho_i)$.

На выходе умножителя (на скорость света c) формируется результат измерения псевдодальности до НКА №1, который в соответствии с (8, 25) и (1) можно записать в виде

$$\begin{aligned} c(\bar{\tau} + \delta\tau_{ш}) &= c(\tau_0 + \overline{\delta\tau_{и}} + \delta\tau_{ш}) = c(\tau_0 + \delta\tau_{и} + \Delta\tau_{и\kappa} + \Delta\tau_{иc}) + c \cdot \delta\tau_{ш} = \\ &= R_0 + \delta R_{и} + \Delta R_{и\kappa} + \Delta R_{иc} + \delta R_{ш} = R_0 + \overline{\delta R_{и}} + \delta R_{ш} = R_0 + \delta R = R, \end{aligned} \quad (26a)$$

где

$$\begin{aligned} \overline{\delta R_{и}} &= \overline{\delta\tau_{и}}c = \delta R_{и} + \Delta R_{и\kappa} + \Delta R_{иc} = 40,3 \overline{N_T(\rho)} \sec \alpha / f_0^2 = \\ &= 40,3 \left(\overline{N_T} + \Delta N_{Тк}(\rho) + \Delta N_{Тс}(\rho) \right) \sec \alpha / f_0^2 \end{aligned} \quad (26b)$$

– среднее значение ионосферной погрешности измерения псевдодальности с учетом влияния крупно- и среднемасштабных вариаций ПЭС ионосферы.

В блоке вторичной обработки (БВО) результаты измерений псевдодальности до НКА №1 (26)

$$R_1 = R_0 + \overline{\delta R_{и}} + \delta R_{ш} = R_0 + \delta R_{и} + \Delta R_{и\kappa} + \Delta R_{иc} + \delta R_{ш}$$

и трех других НКА (R_2, R_3, R_4), полученных аналогичным образом, используются для определения координат НАП с погрешностью

$$\begin{aligned} \delta x &= \Gamma \delta R = \Gamma (\overline{\delta R_{и}} + \delta R_{ш}) = \Gamma (\delta R_{и} + \Delta R_{и\kappa} + \Delta R_{иc} + \delta R_{ш}) = \\ &= \Gamma c (\overline{\delta\tau_{и}} + \delta\tau_{ш}) = \Gamma c (\delta\tau_{и} + \Delta\tau_{и\kappa} + \Delta\tau_{иc} + \delta\tau_{ш}) = \\ &= \delta x_{и} + \Delta x_{и\kappa} + \Delta x_{иc} + \delta x_{ш} = \overline{\delta x_{и}} + \delta x_{ш}, \end{aligned} \quad (27)$$

где $\overline{\delta x_{и}} = \Gamma \overline{\delta R_{и}} = \Gamma c \overline{\delta\tau_{и}}$ – среднее значение ионосферной погрешности определения координат НАП СРНС с учетом влияния крупно- и среднемасштабных неоднородностей; $\delta x_{ш} = \Gamma \delta R_{ш} = \Gamma c \delta\tau_{ш}$ – шумовая составляющая определения координат НАП; Γ – геометрический фактор, который зависит от расположения НКА №1...НКА №4 относительно НАП и обычно [15-17] составляет $\Gamma \approx 1,5 \dots 3$.

Влияние мелкомасштабных флуктуаций ПЭС ионосферы $\Delta N_{ТМ}(\rho) = \Delta N_T(\rho_i)$ на измерение среднего времени запаздывания входного сигнала $\bar{\tau}$ состоит в том, что они обуславливают формирование комплексной огибающей принимаемого сигнала $\dot{S}_r(t)$ различного вида (12, 19, 23), что является причиной изменения шумовой погрешности определения времени запаздывания $\delta\tau_{ш}$ принимаемого сигнала и псевдодальности $\delta R_{ш} = c \delta\tau_{ш}$ до НКА в одночастотной НАП СРНС.

Таким образом, на основе разработки модели ионосферы (рис. 1) и трансionoсферного РРВ (рис. 2) с учетом влияния неоднородностей электронной концентрации различных масштабов обосновано, что крупно- и среднемасштабные вариации ПЭС ионосферы ($\Delta N_{T_k}(\rho)$, $\Delta N_{T_c}(\rho)$) обуславливают возрастание среднего значения ионосферной составляющей $\overline{\delta R_{и}}$ погрешности измерения псевдодальности $\delta R = \overline{\delta R_{и}} + \delta R_{ш}$ в НАП СРНС.

При этом полученное выражение (26б) устанавливает аналитическую зависимость $\overline{\delta R_{и}} = \psi(f_0 = f_{02}, \overline{N_T}, \Delta N_{T_k}(\rho), \Delta N_{T_c}(\rho))$ ионосферной составляющей погрешности измерения псевдодальности в одночастотной НАП СРНС от несущей частоты $f_0 = f_{02}$ сигнала и среднего (фонового) значения ПЭС ионосферы $\overline{N_T}(\rho) = \overline{N_T} + \Delta N_{T_k}(\rho) + \Delta N_{T_c}(\rho)$, учитывающего крупно- и среднемасштабные неоднородности ЭК.

Полученные результаты качественного анализа показали, что мелкомасштабные флуктуации ПЭС ($\Delta N_{T_m}(\rho) \equiv \Delta N_T(\rho_i)$) определяют относительное запаздывания приходящих лучей (9) $\Delta \tau_i \sim \Delta N_T(\rho_i) / f_0^2$ и обуславливают возникновение рэлеевских замираний амплитуды принимаемых сигналов (17-19) или их ЧСЗ (11-14), сопровождаемых искажениями формы огибающей. Эти замирания могут служить причиной возрастания шумовой составляющей погрешности измерения псевдодальности $\delta R_{ш}$ одночастотной НАП СРНС.

2. Методика оценки влияния мелкомасштабных неоднородностей ионосферы на погрешность определения псевдодальности одночастотной НАП СРНС

Чтобы установить аналитическую зависимость $\delta R_{ш} = \psi(f_0, F_0, E_r/N_0, \sigma_{\Delta N_T})$ шумовой погрешности измерения псевдодальности в одночастотной НАП СРНС от частотных параметров передаваемых сигналов СРНС (несущей частоты $f_0 = f_{02}$ и полосы спектра F_{0y} , $F_{0ш}$), отношения сигнал/шум (E_r/N_0) и характеристик мелкомасштабных флуктуаций ПЭС ионосферы $\Delta N_{T_m}(\rho) \equiv \Delta N_T(\rho_i)$ (их среднеквадратического отклонения $\sigma_{\Delta N_T}$ относительно среднего значения $\overline{N_T}$) необходимо конкретизировать схему обработки принимаемых сигналов в приемнике измерения среднего времени запаздывания сигналов в одночастотной НАП СРНС (рис. 3).

Шумовая погрешность измерения среднего времени запаздывания ($\overline{\tau}$) принимаемого сигнала ($\delta \tau_{ш} = \delta R_{ш} / c$) характеризуется ее среднеквадратическим отклонением (СКО) $\sigma_{\tau} = (\overline{\delta \tau_{ш}^2})^{0,5}$. Минимальное значение $\sigma_{\tau} = (\overline{\delta \tau_{ш}^2})^{0,5}$ обеспечивается на выходе схемы оптимального некогерентного (НК) приемника измерения $\overline{\tau}$, которую можно реализовать (рис. 3) на согласованном фильтре (СФ), детекторе огибающей (ДО) и схеме выбора максимума (СВМ) [26].

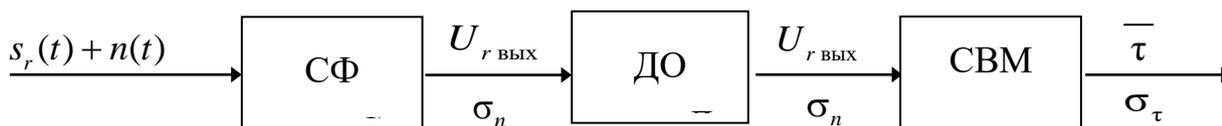


Рис. 3. Схема оптимального некогерентного приемника измерения среднего времени запаздывания ($\bar{\tau}$) принимаемого сигнала

Следует отметить, что возникновение рэлеевских замираний и ЧСЗ в каналах СНРС в условиях создания искусственных возмущений ионосферы, сопровождаемых образованием интенсивных мелкомасштабных неоднородностей, подтверждено результатами эксперимента [13, 14]. На рис. 4 показаны изменения амплитуды и формы огибающей выходного сигнала согласованного фильтра и детектора огибающей при воздействии на вход измерительного приемника (рис. 3) сигнала с рэлеевскими (неселективными) замираниями (рис. 4а) и с ЧСЗ (рис. 4б), заимствованные из [14]. В последнем случае наблюдается «расплывание» выходного сигнала в пределах значительного интервала времени задержки.

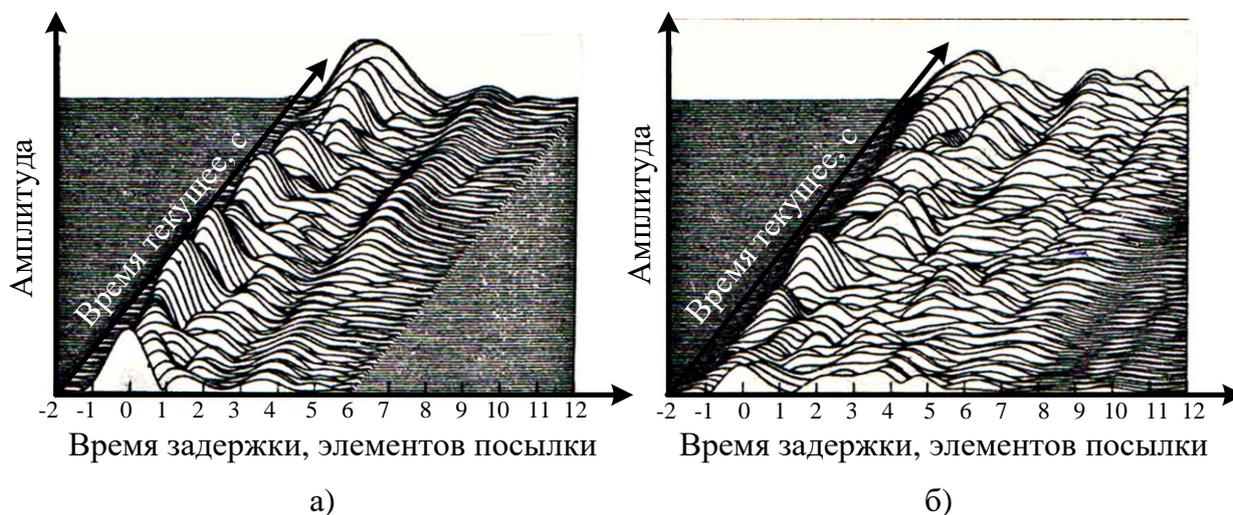


Рис. 4. Амплитуда сигнала на выходе согласованного фильтра при рэлеевских (а) и частотно-селективных (б) замираниях

Анализ рис. 4б указывает на то, что погрешность измерения времени запаздывания сигнала (а значит и псевдодальности) при транссионферном распространении радиоволн может значительно увеличить погрешность, обусловленную влиянием только шумов приемника. Однако исследование влияния ЧСЗ, обусловленных возмущениями в ионосфере, ограничивается в [12-14] только помехоустойчивостью широкополосных систем связи. Недостатком данных исследований является то, что погрешность определения псевдодальности и координат потребителя не рассматривалась, хотя при проведении экспериментов применялся широкополосный сигнал, используемый в спутниковой радионавигационной системе GPS.

Для разработки методики оценки влияния мелкомасштабных неоднородностей ионосферы на погрешность определения псевдодальности в оптималь-

ной схеме измерения (рис. 3) целесообразно сначала на качественном уровне показать влияние ширины «расплывания» выходного сигнала СФ и ДО на погрешность измерения времени задержки принимаемого сигнала с рэлеевскими замираниями и с ЧСЗ.

При воздействии на вход оптимальной схемы измерения (рис. 3) принимаемого сигнала $s_r(t)$ без замираний (23) или с рэлеевскими замираниями (19) в отсутствие шумов ($n(t)=0$) в момент времени $t = \bar{\tau} + T_s$ (когда сигнал длительностью T_s полностью войдет в СФ) на выходе СФ и ДО напряжение достигнет максимальной величины $U_{r \text{ ВЫХ}}(t)$, как показано на рис. 5. При наличии шумов $n(t)$ максимальная величина выходного напряжения $U_{r \text{ ВЫХ}}(t)$ появится в момент времени $t = \bar{\tau} + T_s \pm \delta\tau_{\text{ш}}$, отличный от истинного значения $\bar{\tau} + T_s$ на величину шумовой погрешности $\delta\tau_{\text{ш}}$. Очевидно, что ее величина будет тем меньше, чем меньше длительность сигнала T_s и больше отношение максимального выходного напряжения $U_{r \text{ ВЫХ}}(t)$ к СКО шума $\sigma_n = (\overline{n^2(t)})^{0.5}$, т.е. $\delta\tau_{\text{ш}} \sim T_s / (U_{r \text{ ВЫХ}} / \sigma_n)$ [27]. Поэтому СКО измерения времени запаздывания ($\bar{\tau}$) принимаемого сигнала $s_r(t)$ оптимальной некогерентной схемой рис. 3 можно на качественном уровне описать как

$$\sigma_{\tau} = (\overline{\delta\tau_{\text{ш}}^2})^{0.5} \sim T_s / (U_{r \text{ ВЫХ}} / \sigma_n) \sim ((U_{r \text{ ВЫХ}} / \sigma_n) \Delta F_0)^{-1}. \quad (28)$$

В соответствии с (28) СКО шумовой погрешности измерения времени запаздывания уменьшается при увеличении отношения сигнал/шум по напряжению ($U_{r \text{ ВЫХ}} / \sigma_n$) и ширины спектра сигнала $\Delta F_0 \sim 1/T_s$.

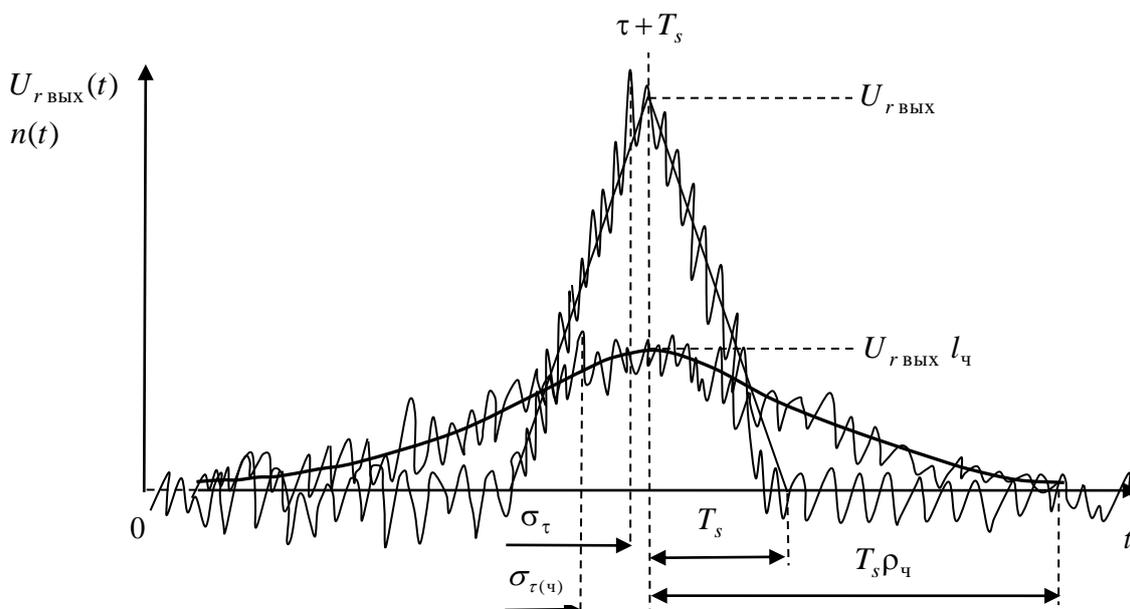


Рис. 5. Влияние параметров выходного сигнала согласованного фильтра на погрешность измерения времени запаздывания входного сигнала

При воздействии на вход оптимальной схемы измерения времени запаздывания (рис. 3) принимаемого сигнала $s_r(t)$ с ЧСЗ (12) будет иметь место расхождение по форме огибающей принимаемого сигнала, искаженной из-за ЧСЗ, и заложенной в СФ копии передаваемого сигнала. Вследствие этого происходит «расплывание» отклика СФ (рис. 5), которое сопровождается уменьшением его амплитуды $U_{r \text{ Вых}} l_{\text{ч}} < U_{r \text{ Вых}}$ в $l_{\text{ч}}$ раз и «остроты» (т.е. увеличением ширины основания $T_s \rho_{\text{ч}} > T_s$ в $\rho_{\text{ч}}$ раз). Поэтому СКО измерения времени запаздывания принимаемого сигнала с ЧСЗ оптимальной некогерентной схемой рис. 3 можно на качественном уровне описать выражением вида

$$\sigma_{\tau(\text{ч})} \sim T_s \rho_{\text{ч}} / \left(\frac{U_{r \text{ Вых}} l_{\text{ч}}}{\sigma_n} \right) \sim \left(\frac{U_{r \text{ Вых}} l_{\text{ч}}}{\sigma_n} \cdot \frac{\Delta F_0}{\rho_{\text{ч}}} \right)^{-1} = \sigma_{\tau} \left(\frac{\rho_{\text{ч}}}{l_{\text{ч}}} \right), \quad (29)$$

где $l_{\text{ч}} \leq 1$ – коэффициент уменьшения максимального значения амплитуды сигнала на выходе СФ ($U_{r \text{ Вых}}$), а $\rho_{\text{ч}} \geq 1$ – коэффициент увеличения длительности ($T_s \sim 1/\Delta F_0$) сигнала на выходе СФ вследствие ЧСЗ входного сигнала. Поэтому погрешность измерения времени запаздывания сигнала, подверженного ЧСЗ, в схеме рис. 3 будет больше, чем сигнала с неселективными замираниями: $\sigma_{\tau(\text{ч})} \sim \sigma_{\tau} (\rho_{\text{ч}}/l_{\text{ч}}) > \sigma_{\tau}$.

Чтобы получить выражение для оценки СКО измерения времени запаздывания принимаемого сигнала с ЧСЗ (12) на выходе приемника НАП СРНС $\sigma_{\tau(\text{ч})}$, необходимо определить функцию рассеяния трансionoсферного канала $\sigma(\Delta\tau)$. Анализ выражений (16) и (13-15) указывает на наличие зависимости $\sigma(\Delta\tau) = \psi(\Delta\tau(\rho_i) \approx 1/\Delta F_{\text{к}})$ функции рассеяния трансionoсферного канала от полосы его когерентности, но лишь на качественном уровне. Получение более точной зависимости $\sigma(\Delta\tau) = \psi(\Delta F_{\text{к}})$ возможно на основе построения не многолучевых, а структурно-физических моделей трансionoсферного радиоканала [11]. Такие модели позволяют получить искомую зависимость $\sigma(\Delta\tau) = \psi(\Delta F_{\text{к}})$ в виде произведения коэффициента ослабления (K_{oc}) радиоканала на нормированную функцию рассеяния $\sigma_{\text{н}}(\Delta\tau)$ с гауссовским законом распределения вероятностей:

$$\sigma(\Delta\tau) = K_{\text{oc}} \sigma_{\text{н}}(\Delta\tau) = K_{\text{oc}} \left(\sqrt{2\pi} \sigma_{\tau_2} \right)^{-1} \exp(-\Delta\tau^2 / 2\sigma_{\tau_2}^2). \quad (30)$$

При этом параметр σ_{τ_2} связан с полосой когерентности $\Delta F_{\text{к}}$ трансionoсферного канала выражением [11]

$$\sigma_{\tau_2} = \sigma_{\varphi} (1 + d_1^2 / 2)^{1/2} / \omega_0 = \sigma_{\tau_0} (1 + d_1^2 / 2)^{1/2} = 1 / \sqrt{2\pi} \Delta F_{\text{к}}, \quad (31)$$

где

$$\Delta F_{\text{к}} = \sqrt{2} f_0 / \sigma_{\varphi} (1 + d_1^2 / 2)^{1/2} = \sqrt{2} f_0 / \sigma_{\varphi} D_1 = \sqrt{2} / \sigma_{\tau_0} D_1. \quad (32)$$

Согласно (32) значение $\Delta F_{\text{к}} \sim 1/\sigma_{\tau_0} = \omega_0/\sigma_{\varphi}$ определяется СКО флуктуаций времени относительного запаздывания различных участков фронта волны на выходе неоднородной ионосферы σ_{τ_0} (аналог времени

относительного запаздывания $\Delta\tau_i = 40,3\Delta N_T(\rho_i)\sec\alpha/c f_0^2$ и СКО флуктуаций фазового фронта этой волны $\sigma_\varphi = \omega_0\sigma_{\tau_0}$ (аналог относительных фазовых сдвигов $\Delta\varphi_i = \omega_0\Delta\tau_i = 80,6\pi\Delta N_T(\rho_i)\sec\alpha/c f_0$) $\Delta\tau_i$ и СКО флуктуаций фазового фронта этой волны $\sigma_\varphi = \omega_0\sigma_{\tau_0}$ (аналог относительных фазовых сдвигов $\Delta\varphi_i = \omega_0\Delta\tau_i = 80,6\pi\Delta N_T(\rho_i)\sec\alpha/c f_0$), а также величиной дифракционного параметра $d_1^2 \geq 1$.

Входящее в (32) СКО флуктуаций фазового фронта выходной волны $\sigma_\varphi = \omega_0\sigma_{\tau_0}$ зависит от СКО мелкомасштабных флуктуаций ПЭС ионосферы $\left(\overline{\Delta N_T^2(\rho_i)}\right)^{0,5} \equiv \left(\overline{\Delta N_{Tm}^2(\rho)}\right)^{0,5} = \sigma_{\Delta N_T}$ согласно выражению [8, 11, 12]

$$\sigma_\varphi \approx 80,6\pi\left(\overline{\Delta N_T^2(\rho_i)}\right)^{0,5} \sqrt{\sec\alpha} / c f_0 = 80,6\pi\sigma_{\Delta N_T} \sqrt{\sec\alpha} / c f_0. \quad (33)$$

Входящий в (32) параметр D_1 определяются как [11, 12]

$$D_1 = (1 + d_1^2 / 2)^{1/2} \geq 1, \quad (34)$$

где

$$d_1^2 = (3h_B^2 - 3h_B h_3 + h_3^2)c^2 \sec^2 \alpha / 192\pi^2 f_0^2 (l_m l_0)^2 = \\ = (3h_B h_H + h_3^2)c^2 \sec^2 \alpha / 192\pi^2 f_0^2 (l_m l_0)^2. \quad (35)$$

Здесь $h_B \approx 600$ км – высота верхней границы ионосферы с эквивалентной толщиной $h_3 \approx 500...400$ км; $h_H = h_B - h_3 \approx 100$ км – высота нижней границы ионосферы; $l_m \approx 1$ м и $l_0 \approx 200...400$ м – минимальный и максимальный размеры мелкомасштабных неоднородностей ЭК ионосферы. В соответствии с (34) параметр $D_1 \geq 1$ возрастает по мере увеличения с эквивалентной толщины ионосферы h_3 , высоты ее нижней границы h_H и зенитного угла α , а также уменьшения несущей частоты f_0 и размеров l_m , l_0 мелкомасштабных неоднородностей: $D_1 = \psi(h_H, h_3, \alpha, f_0^{-1}, l_m^{-1}, l_0^{-1})$.

В соответствии с (32-34) полоса когерентности трансionoсферного радиоканала описывается выражением [11]

$$\Delta F_k \approx \sqrt{2}c f_0^2 / 80,6\pi D_1 \sigma_{\Delta N_T} \sqrt{\sec\alpha}, \quad (36)$$

которое соответствует по виду качественному выражению (11) $\Delta F_k \approx 1 / \Delta\tau_i = c f_0^2 / 40,3\Delta N_T(\rho_i)\sec\alpha$.

Таким образом, выражение (12) для принимаемого сигнала и его средней мощности (15) полностью описывают модель трансionoсферного канала с ЧСЗ, а выражения (30-35) устанавливают взаимосвязь $\sigma(\Delta\tau) = \psi(\Delta F_k \sim f_0 / \sigma_{\Delta N_T})$ функции рассеяния трансionoсферного канала с полосой его когерентности и СКО мелкомасштабных флуктуаций ПЭС в ионосфере.

Известно [28], что при воздействии на вход оптимального НК измерительного приемника (рис. 3) аддитивной смеси (24) $y(t) = s_r(t) + n(t)$ ГБШ и сигнала (12) с ЧСЗ и известной функцией рассеяния (30-35) на выходе приемника обеспечивается минимальное СКО измерения среднего времени запаздывания принимаемого сигнала $\bar{\tau}$, которое можно записать в следующем виде:

$$\sigma_{\tau_{(ч)}} = \left(2\bar{E}_r \left(\bar{E}_r \eta_{ч} / N_0 (N_0 + \bar{E}_r \eta_{ч}) \right) (\Delta\Omega_s \mu_{ч})^2 \right)^{-0.5}. \quad (37)$$

Здесь $\bar{E}_r = E_r$ – средняя энергия принимаемого сигнала, равная согласно (22) его энергии в канале без замираний ($E_r = E_t K_{oc}$); N_0 – спектральная плотность мощности ГБШ на входе оптимального приемника; $\bar{E}_r / N_0 = \bar{h}^2 = E_r / N_0 = h^2$ – среднее отношение сигнал/шум на входе измерительного приемника, равное его значению при отсутствии замираний; $\Delta\Omega_s \sim \Delta F_0 \approx 1/T_s$ – эффективная ширина спектра сигнала; $\eta_{ч} \leq 1$ – коэффициент энергетических потерь (т.е. уменьшения средней энергии принимаемого сигнала \bar{E}_r) при корреляционной обработке сигнала, подверженного ЧСЗ; $\mu_{ч} \leq 1$ – коэффициент сужения эффективной ширины спектра $\Delta\Omega_s$ сигнала из-за ЧСЗ.

В частном случае отсутствия ЧСЗ коэффициенты $\eta_{ч} = \mu_{ч} = 1$, и выражение (37) сводится к известному [24, 26] виду:

$$\sigma_{\tau} = \left(2\bar{E}_r \left(\bar{E}_r / N_0 (N_0 + \bar{E}_r) \right) (\Delta\Omega_s)^2 \right)^{-0.5}, \quad (38)$$

характерному для СКО шумовой погрешности измерения среднего времени запаздывания сигнала с рэлеевскими замираниями.

Это выражение при больших значениях отношения сигнал/шум $\bar{h}^2 = \bar{E}_r / N_0 \gg 1$ сводится к виду

$$\sigma_{\tau} \approx \left((2\bar{E}_r / N_0) \Delta\Omega_s^2 \right)^{-0.5} = \left((2\bar{E}_r / N_0)^{0.5} \Delta\Omega_s \right)^{-1}, \quad (39)$$

которое с учетом равенства $\bar{h}^2 = \bar{E}_r / N_0 = E_r / N_0 = h^2$ соответствует выражению для потенциальной точности измерения времени запаздывания сигнала (23) без замираний [24, 26]

$$\sigma_{\tau} = \left((2E_r / N_0) \Delta\Omega_s^2 \right)^{-0.5} = \left((2E_r / N_0)^{0.5} \Delta\Omega_s \right)^{-1}. \quad (40)$$

Анализ выражений (37) для $\sigma_{\tau_{(ч)}}$ и (38-40) для σ_{τ} показывает, что по виду (37) соответствует качественному выражению (29) $\sigma_{\tau_{(ч)}} \sim \sigma_{\tau} (\rho_{ч} / l_{ч})$, где $\sigma_{\tau} \approx \left((2\bar{E}_r / N_0)^{0.5} \Delta\Omega_s \right)^{-1}$; $l_{ч} = \left(\bar{E}_r \eta_{ч} / (N_0 + \bar{E}_r \eta_{ч}) \right)^{-0.5} \leq 1$; $\rho_{ч} = \mu_{ч}^{-1} \geq 1$.

Конкретизация выражения (37) при передаче сигнала с эффективной шириной спектра, описываемой выражением $\Delta\Omega_s = \sqrt{\pi} \Delta F_0 = \sqrt{\pi} / T_s$, по транссионосферному каналу с полосой когерентности (36) $\Delta F_k \approx \sqrt{2} c f_0^2 / 80, 8\pi D_1 \sigma_{\Delta N_T} \sqrt{\sec \alpha}$ позволяет записать его в виде

$$\sigma_{\tau_{(ч)}} = \left(\left(2\bar{E}_r \left(\bar{E}_r \eta_{ч} / N_0 (N_0 + \bar{E}_r \eta_{ч}) \right) \right)^{0.5} (\sqrt{\pi} \Delta F_0 \mu_{ч}) \right)^{-1}, \quad (41)$$

где указанные коэффициенты $\eta_{\text{ч}}$ и $\mu_{\text{ч}}$ принимают конкретный вид, зависящий от частотных параметров передаваемых сигналов $(f_0, \Delta F_0)$ и СКО мелкомасштабных флуктуаций ПЭС ионосферы $(\sigma_{\Delta N_T})$:

$$\eta_{\text{ч}} = \left(1 + \frac{4\Delta F_0^2}{\pi\Delta F_{\text{к}}^2}\right)^{-0,5} = \left(1 + \frac{4\Delta F_0^2}{\pi} \left(\frac{80,8\pi D_1 \sigma_{\Delta N_T} \sqrt{\sec \alpha}}{\sqrt{2}cf_0^2}\right)^2\right)^{-0,5} \leq 1; \quad (42)$$

$$\mu_{\text{ч}} = \left(1 + \frac{4\Delta F_0^2}{\pi\Delta F_{\text{к}}^2}\right)^{-3/4} = \left(1 + \frac{4\Delta F_0^2}{\pi} \left(\frac{80,8\pi D_1 \sigma_{\Delta N_T} \sqrt{\sec \alpha}}{\sqrt{2}cf_0^2}\right)^2\right)^{-3/4} \leq 1. \quad (43)$$

Выражение (41) для определения СКО измерения среднего времени $\bar{\tau}$ запаздывания принимаемого сигнала с ЧСЗ в НАП СРНС при больших значениях отношения сигнал/шум (\bar{E}_r/N_0) , когда выполняется соотношение $\bar{E}_r\eta_{\text{ч}}/N_0 \gg 1$, сводится к виду

$$\sigma_{\tau(\text{ч})} \approx \left(\left(2\bar{E}_r/N_0\right)^{0,5} \sqrt{\pi\Delta F_0} \mu_{\text{ч}}\right)^{-1}. \quad (44)$$

В частном случае отсутствия СКО мелкомасштабных флуктуаций ПЭС в ионосфере $(\sigma_{\Delta N_T}=0)$ коэффициент $\mu_{\text{ч}}=1$ и выражение (44) сводится к виду $\sigma_{\tau} = \left((2\bar{E}_r/N_0)^{0,5} \sqrt{\pi\Delta F_0}\right)^{-1}$, который при $\Delta\Omega_s = \sqrt{\pi\Delta F_0}$ соответствует потенциальной точности измерения времени запаздывания (40) сигнала без замираний.

При увеличении СКО мелкомасштабных флуктуаций ПЭС в ионосфере $\sigma_{\Delta N_T}$ до значений, при которых согласно (36) выполняется условие (17) возникновения рэлеевских замираний принимаемых сигналов:

$$\Delta F_0 \ll \Delta F_{\text{к}}, \text{ или } \sigma_{\Delta N_T} \ll \sqrt{2}cf_0^2/80,8\pi D_1 \sqrt{\sec \alpha} \Delta F_0, \quad (45)$$

коэффициент $\mu_{\text{ч}} \approx 1$ и выражение (44) сводится к виду (39) при $\Delta\Omega_s = \sqrt{\pi\Delta F_0}$:

$$\sigma_{\tau} \approx \left(\left(2\bar{E}_r/N_0\right)^{0,5} \sqrt{\pi\Delta F_0}\right)^{-1} = \left((2\bar{E}_r/N_0)^{0,5} \sqrt{\pi\Delta F_0}\right)^{-1} \quad (46)$$

для определения СКО измерения среднего времени $\bar{\tau}$ запаздывания принимаемого сигнала (19) с рэлеевскими замираниями, значение которого практически не меняется по сравнению со случаем отсутствия замираний (40).

При дальнейшем увеличении СКО мелкомасштабных флуктуаций ПЭС в ионосфере $\sigma_{\Delta N_T}$ до значений, при которых выполняется условие (11) возникновения ЧСЗ принимаемых сигналов:

$$\Delta F_0 \geq F_{\text{к}}, \text{ или } \sigma_{\Delta N_T} \geq \sqrt{2}cf_0^2/80,8\pi D_1 \sqrt{\sec \alpha} \Delta F_0, \quad (47)$$

коэффициент $\mu_{\text{ч}}^{-1} \approx \left(1 + \left(4\Delta F_0^2 / \pi \Delta F_{\text{к}}^2\right)\right)^{3/4} > 1$ и СКО измерения среднего времени $\bar{\tau}$ запаздывания принимаемого сигнала (12) с ЧСЗ (44) будет возрастать в $\mu_{\text{ч}}^{-1}$ раз по сравнению со случаем рэлеевских замираний (46):

$$\sigma_{\tau(\text{ч})} \approx \left(\left(2\bar{E}_r / N_0\right)^{0.5} \sqrt{\pi \Delta F_0} \right)^{-1} \mu_{\text{ч}}^{-1} = \sigma_{\tau} \mu_{\text{ч}}^{-1}. \quad (48)$$

В соответствии с выражениями (26, 44, 48) СКО шумовой погрешности определения псевдодальности в одночастотной (т.е. на несущей частоте $f_0 \approx 1,6$ ГГц) НАП СРНС (рис. 2) с оптимальной схемой измерения (рис. 3) в общем случае возникновения ЧСЗ принимаемых сигналов определяется как

$$\sigma_{R(\text{ч})} = \left(\overline{\delta\tau^2}\right)^{0.5} c = \sigma_{\tau(\text{ч})} c \approx \sigma_{\tau} \mu_{\text{ч}}^{-1} c = \sigma_R \mu_{\text{ч}}^{-1}, \quad (49)$$

где

$$\sigma_R = \sigma_{\tau} c = \left(\left(2\bar{E}_r / N_0\right)^{0.5} \sqrt{\pi \Delta F_0} \right)^{-1} c = \left((2E_r / N_0)^{0.5} \sqrt{\pi \Delta F_0} \right)^{-1} c \quad (50)$$

– СКО шумовой погрешности определения псевдодальности в одночастотной НАП СРНС при рэлеевских замираниях (или в отсутствие замираний), а коэффициент $\mu_{\text{ч}}^{-1}$ описывается согласно (43) выражением

$$\mu_{\text{ч}}^{-1} = \left(1 + \frac{4\Delta F_0^2}{\pi \Delta F_{\text{к}}^2}\right)^{3/4} = \left(1 + \frac{4\Delta F_0^2}{\pi} \left(\frac{80,8\pi D_1 \sigma_{\Delta N_T} \sqrt{\sec \alpha}}{\sqrt{2cf_0^2}}\right)^2\right)^{3/4} \geq 1 \quad (51)$$

и характеризует увеличение СКО шумовой погрешности определения псевдодальности (σ_R) в одночастотной НАП СРНС по мере увеличения степени ЧСЗ (т.е. отношения $\Delta F_0 / \Delta F_{\text{к}}$) принимаемых сигналов.

Согласно (49) при увеличении СКО мелкомасштабных флуктуаций ПЭС в ионосфере $\sigma_{\Delta N_T}$ до значений, при которых выполняется условие возникновения ЧСЗ (47) $\Delta F_0 / \Delta F_{\text{к}} \geq 1$, СКО измерения псевдодальности в НАП СРНС будет возрастать по сравнению со случаем возникновения (45) рэлеевских замираний или их отсутствия: $\sigma_{R(\text{ч})} \approx \sigma_R \mu_{\text{ч}}^{-1} > \sigma_R$.

Таким образом, на основе анализа схемы измерения времени запаздывания ($\bar{\tau}$) принимаемого сигнала (рис. 3) и влияния параметров выходного сигнала (рис. 5) согласованного фильтра ($U_{r \text{ вых}}(t)$, $n(t)$) на СКО шумовой погрешности измерения времени запаздывания входного сигнала $\sigma_{\tau} = \left(\overline{\delta\tau_{\text{ш}}^2}\right)^{0.5}$ разработана методика оценки влияния мелкомасштабных неоднородностей ионосферы на погрешность определения псевдодальности одночастотной НАП СРНС. Она включает следующие этапы:

1) установление взаимосвязи (30-32) $\sigma(\Delta \tau) = \psi(\Delta F_{\text{к}} \sim f_0 / \sigma_{\Delta N_T})$ функции рассеяния трансionoсферного канала с полосой его когерентности $\Delta F_{\text{к}}$ и ана-

литической зависимости этой полосы (33-36) $\Delta F_k \sim f_0 / \sigma_{\Delta N_T}$ от несущей частоты и СКО мелкомасштабных флуктуаций ПЭС в ионосфере $\sigma_{\Delta N_T} = \left(\overline{\Delta N_T^2(\rho_i)} \right)^{0.5}$;

2) установление аналитической зависимости (49) СКО измерения шумовой погрешности определения псевдодальности $\sigma_{R(ч)} = \sigma_R \mu_{ч}^{-1}$ от коэффициента (51) $\mu_{ч}^{-1} = \psi(\Delta F_0 / \Delta F_k)$ увеличения СКО шумовой погрешности определения псевдодальности (50) $\sigma_R = \psi(\overline{E_r} / N_0, \Delta F_0)$ в каналах с рэлеевскими замираниями (или без замираний) по мере увеличения степени ЧСЗ ($\Delta F_0 / \Delta F_k$) принимаемых сигналов.

В результате разработки методики установлена аналитическая зависимость $\sigma_{R(ч)} = \psi(f_0, F_0, \overline{E_r} / N_0, \sigma_{\Delta N_T})$ шумовой погрешности измерения псевдодальности в одночастотной НАП СРНС от частотных параметров передаваемых сигналов СРНС (несущей частоты f_0 и полосы спектра F_0), отношения сигнал/шум $\overline{E_r} / N_0$ на входе приемника и среднеквадратического отклонения мелкомасштабных флуктуаций ПЭС ионосферы $\sigma_{\Delta N_T} = \left(\overline{\Delta N_T^2(\rho_i)} \right)^{0.5}$ в виде совокупности выражений (49-51).

Напомним, что погрешность измерения псевдодальности в одночастотной НАП СРНС определяются суммой (26а) $\delta R = \overline{\delta R_{и}} + \delta R_{ш}$ ее ионосферной и шумовой составляющих, которую с учетом СКО последней $\sigma_R = \left(\overline{\delta R_{ш}^2} \right)^{0.5}$ и выражений (26б) и (49) можно записать в виде

$$\delta R = \overline{\delta R_{и}} + \delta R_{ш} \equiv \overline{\delta R_{и}} + \sigma_{R(ч)} = 40,3 \overline{N_T}(\rho) \sec \alpha / f_0^2 + \sigma_R \mu_{ч}^{-1}, \quad (52)$$

где сомножители (50) $\sigma_R = \psi(\Delta F_0, \overline{E_r} / N_0)$ и (51) $\mu_{ч}^{-1} = \psi(\Delta F_0, f_0, \sigma_{\Delta N_T})$ зависят от частотных параметров передаваемых сигналов СРНС (f_0, F_0), отношения сигнал/шум ($\overline{E_r} / N_0$) на входе измерительного приемника и СКО мелкомасштабных флуктуаций ПЭС ионосферы ($\sigma_{\Delta N_T}$).

Таким образом, в результате проведенного качественного анализа влияния неоднородностей ионосферы различных масштабов и разработанной методики оценки влияния мелкомасштабных неоднородностей ионосферы на погрешность определения псевдодальности одночастотной НАП СРНС получена ее зависимость $\delta R = \psi(f_0, F_0, \overline{E_r} / N_0, \sigma_{\Delta N_T}, \overline{N_T}(\rho))$ от частотных параметров передаваемых сигналов СРНС (несущей частоты f_0 и полосы спектра F_0), отношения сигнал/шум ($\overline{E_r} / N_0$) на входе измерительного приемника и среднеквадратического отклонения мелкомасштабных флуктуаций полного электронного содержания ионосферы $\sigma_{\Delta N_T}$ относительно среднего значения $\overline{N_T}(\rho) = \overline{N_T} + \Delta N_{T_k}(\rho) + \Delta N_{T_c}(\rho)$, учитывающего крупно- и среднемасштабные неоднородности, в виде совокупности выражений (52, 26, 49-51).

3. Методика оценки влияния мелкомасштабных неоднородностей ионосферы на погрешность определения псевдодальности двухчастотной НАП СРНС

Во введении было отмечено, что для уменьшения ионосферной составляющей ($\delta R_{и} = \delta \tau_{иc}$) определения псевдодальности НАП СРНС на БЛА можно использовать режим работы на двух несущих частотах ($f_{01} \approx 1,2$ ГГц и $f_{02} \approx 1,6$ ГГц). Покажем, что применение в НАП (рис. 2) измерительного приемника, использующего двухчастотный режим работы (на верхней $f_{02} = f_{0в} \approx 1,6$ ГГц и нижней $f_{01} = f_{0н} \approx 1,25$ ГГц частотах), позволяет ионосферную погрешность (26 б) $\overline{\delta R_{и}} = \overline{\delta \tau_{иc}} = \delta R_{и} + \Delta R_{и\kappa} + \Delta R_{иc}$ измерения псевдодальности времени запаздывания принимаемого сигнала, включая ее крупномасштабную и среднемасштабную составляющие, полностью устранить, т. е. обеспечить $\overline{\delta R_{и}} = \overline{\delta \tau_{иc}} = \delta R_{и} + \Delta R_{и\kappa} + \Delta R_{иc} = 0$. Однако можно предположить, что при двухчастотном режиме работы НАП может существенно возрастет шумовая погрешность измерений псевдодальности в условиях возникновения ЧСЗ, для которой аналитическое выражение не известно.

Известен [16] алгоритмом измерения времени запаздывания принимаемого сигнала в двухчастотной НАП СРНС на основе заданного отношения частот $m = f_{01} / f_{02}$ и результатов измерения времени запаздывания (τ_2, τ_1) на каждой из двух частот:

$$\tau(2f) = \left(\tau_2 / (1 - m^2) \right) - \left(m^2 \tau_1 / (1 - m^2) \right). \quad (53)$$

В соответствии с этим алгоритмом измерения времени запаздывания принимаемого сигнала в двухчастотной НАП СРНС на рис. 6 представлена двухчастотная схема измерения времени запаздывания принимаемого сигнала при отношении нижней и верхней несущих частот $m = f_{01} / f_{02} = 1,25 \cdot 10^9 / 1,6 \cdot 10^9 = 7 / 9$.

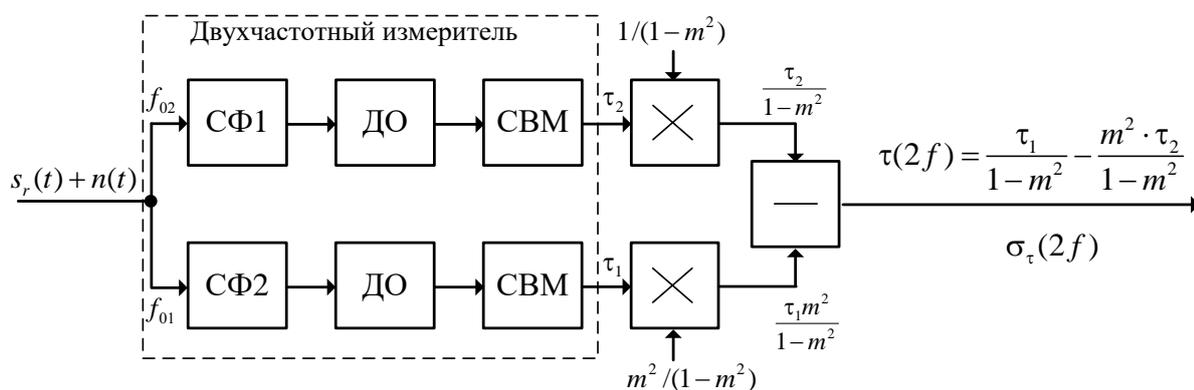


Рис. 6. Двухчастотная (f_{02}, f_{01}) схема измерения времени запаздывания принимаемого сигнала в НАП СРНС

При РРВ на несущих частотах f_{02} и f_{01} через ионосферу с неоднородностями различных масштабов измеряемое на выходе каждого канала обработки

двухчастотной схемы (рис. 5) время запаздывания сигналов определяется аналогично времени запаздывания (25, 8) в одноканальной схеме измерения (рис. 3):

$$\begin{aligned} \tau_2 &\equiv \tau(f_{02}) = \bar{\tau}_2 + \delta\tau_{m2} = \tau_0 + \overline{\delta\tau_{m2}} + \delta\tau_{m2} = \\ &= \tau_0 + \delta\tau_{m2} + 40,3\overline{N_T(\rho)} \sec \alpha_T / cf_{02}^2 = \tau_0 + \delta\tau_{m2} + A/f_{02}^2; \end{aligned} \quad (54a)$$

$$\begin{aligned} \tau_1 &\equiv \tau(f_{01}) = \bar{\tau}_1 + \delta\tau_{m1} = \tau_0 + \overline{\delta\tau_{m1}} + \delta\tau_{m1} = \\ &= \tau_0 + \delta\tau_{m1} + 40,3\overline{N_T(\rho)} \sec \alpha / cf_{01}^2 = \tau_0 + \delta\tau_{m1} + A/f_{01}^2, \end{aligned} \quad (54б)$$

где $A = 40,3\overline{N_T(\rho)} \sec \alpha / c = 40,3(\overline{N_T} + \Delta N_{Tк}(\rho) + \Delta N_{Tс}(\rho)) \sec \alpha / c$.

В соответствии с (53, 54) на выходе вычитающего устройства двухчастотной схемы (рис. 6) измеренное время запаздывания принимаемого сигнала определяется как

$$\begin{aligned} \tau(2f) &= \frac{\tau_2}{1-m^2} - \frac{m^2\tau_1}{1-m^2} = \frac{1}{1-m^2}(\tau_2 - m^2\tau_1) = \\ &= \frac{1}{1-(f_{01}^2/f_{02}^2)} \left(\left(\tau_0 + \frac{A}{f_{02}^2} + \delta\tau_{m2} \right) - \frac{f_{01}^2}{f_{02}^2} \left(\tau_0 + \frac{A}{f_{01}^2} + \delta\tau_{m1} \right) \right) = \\ &= \tau_0 + \frac{\delta\tau_{m2}}{1-m^2} - \frac{m^2\delta\tau_{m1}}{1-m^2} = \tau_0 + \delta\tau_{ш}(2f). \end{aligned} \quad (55)$$

Сравнительный анализ (55) с выражением (54) показывает, что при использовании в НАП СРНС (рис. 2) двухчастотной схемы (рис. 6) измеренное время запаздывания сигнала будет отличаться от истинного значения $\tau_0 = R_0/c$ на величину погрешности $\delta\tau(2f) = \delta\tau_{ш}(2f)$, обусловленной только шумовой составляющей, т.к. задержки времени, вносимые ионосферой с крупно- и среднemasштабными неоднородностями $\overline{N_T(\rho)} = \overline{N_T} + \Delta N_{Tк}(\rho) + \Delta N_{Tс}(\rho)$ будут отсутствовать:

$$\overline{\delta\tau_{ш}}(2f) = \delta\tau_{ш}(2f) + \Delta\tau_{шк}(2f) + \Delta\tau_{шс}(2f) = 0.$$

Поэтому в соответствии с (26б) в двухчастотной НАП СРНС среднее значение ионосферной погрешности измерения псевдодальности с учетом влияния крупно- и среднemasштабных вариаций ПЭС ионосферы равно нулю:

$$\overline{\delta R_{ш}}(2f) = \overline{\delta\tau_{ш}}(2f)c = \delta R_{ш}(2f) + \Delta R_{шк}(2f) + \Delta R_{шс}(2f) = 0.$$

В соответствии с выражением (53, 55) шумовая погрешность в двухчастотной схеме измерения времени запаздывания при $m = f_{01}/f_{02} = 7/9$ определяется как

$$\begin{aligned} \delta\tau_{ш}(2f) &= \frac{\delta\tau_{m2}}{1-m^2} - \frac{m^2\delta\tau_{m1}}{1-m^2} \equiv \frac{\delta\tau_{ш}(f_{02})}{1-m^2} - \frac{m^2\delta\tau_{ш}(f_{01})}{1-m^2} = \\ &= 2,53\delta\tau_{ш}(f_{02}) - 1,53\delta\tau_{ш}(f_{01}). \end{aligned} \quad (56)$$

Очевидно, что при выполнении условия (11, 47) возникновения ЧСЗ шумовая погрешность $\delta\tau_{ш2} \equiv \delta\tau_{ш}(f_{02})$ измерения времени запаздывания принимаемого сигнала (12) на частоте $f_0 = f_{02} \approx 1,6$ ГГц на выходе 2-го канала оптимальной НК обработки двухчастотного измерителя (рис. 6) будет описываться

аналогично шумовой погрешности одноканальной схемы измерения (рис. 3) времени запаздывания (48)

$$\begin{aligned} \sigma_{\tau(\text{ч})}(f_{02}) &= \left(\overline{\delta\tau_{\text{ш}}^2}(f_{02}) \right)^{0,5} \approx \\ &\approx \left(\left(2\bar{E}_r/N_0 \right)^{0,5} \sqrt{\pi\Delta F_0} \right)^{-1} \mu_{\text{ч}}^{-1}(f_{02}) = \sigma_{\tau} \mu_{\text{ч}}^{-1}(f_{02}), \end{aligned} \quad (57a)$$

где $\mu_{\text{ч}}^{-1}(f_{02}) \geq 1$ – коэффициент увеличения СКО шумовой погрешности определения времени запаздывания принимаемых сигналов (46) σ_{τ} в НАП СРНС на верхней частоте $f_0 = f_{02}$ из-за ЧСЗ, определяемый согласно (51) как

$$\begin{aligned} \mu_{\text{ч}}^{-1}(f_{02}) &= \left(1 + \frac{4\Delta F_0^2}{\pi\Delta F_{\text{к}}^2(f_{02})} \right)^{3/4} = \\ &= \left(1 + \frac{4\Delta F_0^2}{\pi} \left(\frac{80,8\pi D_1(f_{02})\sigma_{\Delta N_T} \sqrt{\sec \alpha}}{\sqrt{2}cf_{02}^2} \right)^2 \right)^{3/4} \geq 1, \end{aligned} \quad (57b)$$

где параметр $D_1(f_{02}) = (1 + d_1^2(f_{02})/2)^{1/2} \geq 1$ описывается выражениями (34, 35) при $f_0 = f_{02}$. Аналогично (57) определяется СКО шумовой погрешности $\delta\tau_{\text{ш1}} \equiv \delta\tau_{\text{ш}}(f_{01})$ измерения времени запаздывания принимаемого сигнала с ЧСЗ на нижней частоте $f_0 = f_{01} \approx 1,2$ ГГц на выходе 1-го канала двухчастотного измерителя (рис. 6):

$$\begin{aligned} \sigma_{\tau(\text{ч})}(f_{01}) &= \left(\overline{\delta\tau_{\text{ш}}^2}(f_{01}) \right)^{0,5} \approx \\ &\approx \left(\left(2\bar{E}_r/N_0 \right)^{0,5} \sqrt{\pi\Delta F_0} \right)^{-1} \mu_{\text{ч}}^{-1}(f_{01}) = \sigma_{\tau} \mu_{\text{ч}}^{-1}(f_{01}), \end{aligned} \quad (58a)$$

где

$$\begin{aligned} \mu_{\text{ч}}^{-1}(f_{01}) &= \left(1 + \frac{4\Delta F_0^2}{\pi\Delta F_{\text{к}}^2(f_{01})} \right)^{3/4} = \\ &= \left(1 + \frac{4\Delta F_0^2}{\pi} \left(\frac{80,8\pi D_1(f_{01})\sigma_{\Delta N_T} \sqrt{\sec \alpha}}{\sqrt{2}cf_{01}^2} \right)^2 \right)^{3/4} \geq 1. \end{aligned} \quad (58b)$$

Обычно полагают [16], что в каждом канале измерения времени запаздывания сигналов двухчастотной схемы (рис. 6) шумовые погрешности будут независимы. Поэтому в соответствии с (56) СКО шумовой погрешности измерения времени запаздывания сигналов в двухчастотной схеме (рис. 5) определяется как

$$\sigma_{\tau(\text{ч})}(2f) = \left(\left(2,53\sigma_{\tau(\text{ч})}(f_{02}) \right)^2 + \left(1,53\sigma_{\tau(\text{ч})}(f_{01}) \right)^2 \right)^{0,5}, \quad (59)$$

где $\sigma_{\tau(\text{ч})}(f_{02})$ и $\sigma_{\tau(\text{ч})}(f_{01})$ определяются согласно (57) и (58).

В частном случае отсутствия СКО мелкомасштабных флуктуаций ПЭС в ионосфере ($\sigma_{\Delta N_T} = 0$) или при увеличении СКО мелкомасштабных флуктуаций ПЭС в ионосфере $\sigma_{\Delta N_T}$ до значений, при которых выполняется условие (45) возникновения рэлеевских замираний принимаемых сигналов, коэффициент $\mu_{\text{ч}} = 1$. Тогда в соответствии с (57, 58) выполняется равенство $\sigma_{\tau(\text{ч})}(f_{02}) = \sigma_{\tau(\text{ч})}(f_{01}) = \sigma_{\tau}$ и выражение (59) сводится к виду

$$\begin{aligned} \sigma_{\tau}(2f) &= \left((2,53\sigma_{\tau})^2 + (1,53\sigma_{\tau})^2 \right)^{0,5} = \\ &= \sigma_{\tau} \left((2,53)^2 + (1,53)^2 \right)^{0,5} \approx 3\sigma_{\tau}. \end{aligned} \quad (60)$$

Согласно (60) в двухчастотной НАП СРНС при отсутствии ЧСЗ и ионосферной погрешности $\delta\tau_{\text{н}}(2f) = \overline{\delta\tau_{\text{н}}}(2f) + \Delta\tau_{\text{нк}}(2f) + \Delta\tau_{\text{нс}}(2f) = 0$ в три раза возрастает шумовая составляющая погрешности измерения времени запаздывания сигналов ($\sigma_{\tau}(2f) \approx 3\sigma_{\tau}$) по сравнению с использованием одночастотной НАП (σ_{τ}).

При дальнейшем увеличении СКО мелкомасштабных флуктуаций ПЭС в ионосфере $\sigma_{\Delta N_T}$ до значений, при которых выполняется условие (47) возникновения ЧСЗ принимаемых сигналов коэффициент $\mu_{\text{ч}}^{-1} \approx \left(1 + \left(4\Delta F_0^2 / \pi\Delta F_{\text{к}}^2 \right) \right)^{3/4} > 1$ и СКО измерения среднего времени $\bar{\tau}$ запаздывания принимаемого сигнала (12) с ЧСЗ в двухчастотной НАП будут возрастать по сравнению со случаем (60) рэлеевских замираний: $\sigma_{\tau(\text{ч})}(2f) > \sigma_{\tau}(2f) = 3\sigma_{\tau}$.

В соответствии с (55, 57, 58) выражение (59) для СКО измерения среднего времени $\bar{\tau}$ запаздывания принимаемого сигнала с ЧСЗ в двухчастотной НАП можно записать в наиболее компактном виде как

$$\begin{aligned} \sigma_{\tau(\text{ч})}(2f) &= \left((2,53\sigma_{\tau}\mu_{\text{ч}}^{-1}(f_{02}))^2 + (1,53\sigma_{\tau}\mu_{\text{ч}}^{-1}(f_{01}))^2 \right)^{0,5} = \\ &= \sigma_{\tau} \left((2,53\mu_{\text{ч}}^{-1}(f_{02}))^2 + (1,53\mu_{\text{ч}}^{-1}(f_{01}))^2 \right)^{0,5}. \end{aligned} \quad (61)$$

где σ_{τ} определяется согласно (46), а $\mu_{\text{ч}}^{-1}(f_{02})$, $\mu_{\text{ч}}^{-1}(f_{01})$ – согласно (57б, 58б).

Достоверность полученного выражения (61) подтверждается тем, что в частном случае отсутствия ЧСЗ, когда $\mu_{\text{ч}}(f_{02}) = \mu_{\text{ч}}(f_{01}) = 1$ оно сводится к известному виду (60) $\sigma_{\tau(\text{ч})}(2f) = \sigma_{\tau}(2f) \approx 3\sigma_{\tau}$.

В соответствии с выражениями (49, 50, 61) СКО шумовой погрешности определения псевдодальности в двухчастотной НАП СРНС (рис. 2) определяется как

$$\begin{aligned} \sigma_{R(\text{ч})}(2f) &= \sigma_{\tau(\text{ч})}(2f)c = \\ &= \sigma_{\tau}c \left((2,53\mu_{\text{ч}}^{-1}(f_{02}))^2 + (1,53\mu_{\text{ч}}^{-1}(f_{01}))^2 \right)^{0,5} = \sigma_R\mu_{\text{ч}}^{-1}(2f), \end{aligned} \quad (62)$$

где СКО шумовой погрешности определения псевдодальности в одночастотной НАП при отсутствии ЧСЗ определяется согласно (50) $\sigma_R = \sigma_{\tau}c$, а коэффициент

$\mu_{\text{ч}}^{-1}(2f)$ увеличения СКО шумовой погрешности определения псевдодалности в двухчастотной НАП СРНС в условиях ЧСЗ определяется как

$$\mu_{\text{ч}}^{-1}(2f) = \left((2,53\mu_{\text{ч}}^{-1}(f_{02}))^2 + (1,53\mu_{\text{ч}}^{-1}(f_{01}))^2 \right)^{0,5} \geq 3. \quad (63)$$

Его значение согласно (60) составляет $\mu_{\text{ч}}^{-1}(2f) \approx 3$ при отсутствии ЧСЗ (когда $\mu_{\text{ч}}^{-1}(f_{02}) = \mu_{\text{ч}}^{-1}(f_{01}) = 1$) и $\mu_{\text{ч}}^{-1}(2f) > 3$ – в условиях ЧСЗ.

Таким образом, разработана методика оценки влияния мелкомасштабных неоднородностей ионосферы на погрешность определения псевдодалности двухчастотной НАП СРНС, включающая 2 этапа:

1) обоснование устранения в двухчастотной НАП СРНС (рис. 6) ионосферной погрешности измерения псевдодалности принимаемого сигнала, включая ее крупномасштабную и среднемасштабную составляющие: $\overline{\delta R_{\text{и}}}(2f) = \delta R_{\text{и}}(2f) + \Delta R_{\text{и к}}(2f) + \Delta R_{\text{и с}}(2f) = 0$;

2) установление аналитической зависимости СКО измерения шумовой погрешности определения псевдодалности в двухчастотной НАП (62) $\sigma_{R(\text{ч})}(2f) = \sigma_R \mu_{\text{ч}}^{-1}(2f)$ от коэффициента (63) $\mu_{\text{ч}}^{-1}(2f) = \psi(\mu_{\text{ч}}^{-1}(f_{02}); \mu_{\text{ч}}^{-1}(f_{01}))$ увеличения СКО шумовой погрешности определения псевдодалности (50) $\sigma_R = \psi(\overline{E}_r/N_0, \Delta F_0)$ в каналах с рэлеевскими замираниями (или без замираний) по мере увеличения степени ЧСЗ (т.е. $\Delta F_0/\Delta F_{\text{к}}(f_{02})$, $\Delta F_0/\Delta F_{\text{к}}(f_{01})$) принимаемых сигналов на каждой частоте.

В результате разработки методики установлена аналитическая зависимость $\sigma_{R(\text{ч})}(2f) = \psi(f_0, F_0, \overline{E}_r/N_0, \sigma_{\Delta N_T})$ шумовой погрешности измерения псевдодалности в двухчастотной НАП СРНС от частотных параметров передаваемых сигналов СРНС (несущих частот f_{02} и f_{01} , полосы спектра F_0), отношения сигнал/шум \overline{E}_r/N_0 на входе приемника и среднеквадратического отклонения мелкомасштабных флуктуаций $\sigma_{\Delta N_T}$ виде совокупности выражений (62, 63, 50, 57, 58).

4. Методика оценки влияния мелкомасштабных неоднородностей ионосферы на погрешность определения псевдодалности одночастотной НАП СРНС на БЛА в дифференциальном режиме работы

Известно [16, 17], что в дифференциальном режиме работы НАП СРНС ионосферная составляющая погрешности определения псевдодалности практически устраняется ($\delta R_{\text{и}} \approx 0$), но в 2 раза возрастают шумовые погрешности $\delta R_{\text{ш}}$ и возникают дополнительные погрешности многолучевости ($\delta R_{\text{мл}} \approx 3$ м), обусловленные наземной опорно-измерительной станцией. Поэтому в первом приближении можно считать, что погрешность определения псевдодалности (1) до НКА в дифференциальном режиме работы определяется ее шумовой и многолучевой составляющей и снижается до $\delta R \approx \delta R_{\text{ш}} + \delta R_{\text{мл}}$.

Суть дифференциального метода заключается в проведении измерений двумя приемниками, один из которых находится в пункте с точно известными координатами (опорная измерительная станция), а местоположение второго (НАП) уточняется [15, 17]. Приемник опорной измерительной станции (ОИС) определяет свои координаты по навигационным спутникам и, сравнив их с истинными значениями, вычисляет поправочные коэффициенты, которые передаются второму приемнику для коррекции его координат. В основе дифференциального режима (ДР) лежит свойство пространственно-временной коррелированности погрешностей измерений радионавигационных параметров сигналов НКА, проведенных в различных точках пространства в близкие моменты времени. Принцип ДР заключается в измерении и компенсации коррелированных постоянных и медленно меняющихся во времени и пространстве составляющих погрешностей измерений псевдодальности.

В простейшем случае для организации ДР необходимо использовать два измерительных приемника сигналов, излучаемых НКА №1 (рис. 7), один из которых входит в состав одночастотной НАП и может размещаться на БЛА, другой входит в состав одночастотной ОИС и расположен в точке с известными координатами на Земле. Структура построения ОИС отличается от НАП (рис. 2) наличием блока формирования дифференциальных поправок псевдодальности ($\delta R_{\text{оис}}$).

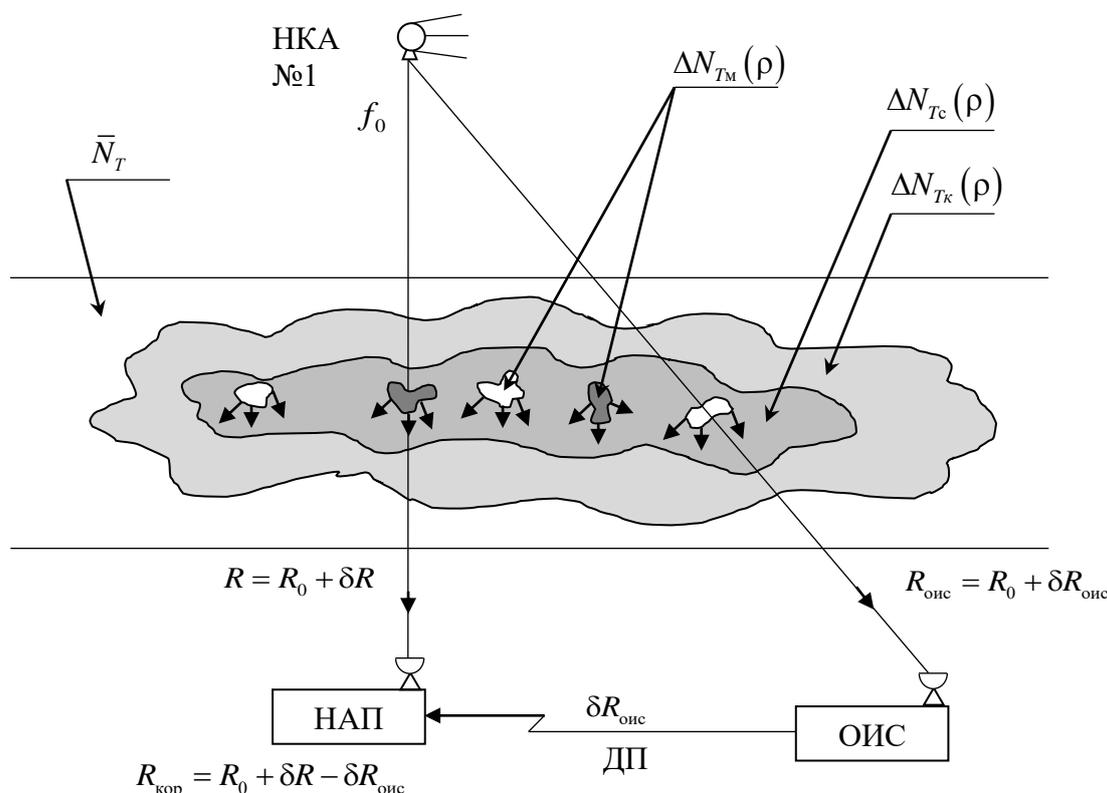


Рис. 7. Компенсация погрешности измерения псевдодальности от НКА до НАП в дифференциальном режиме СРНС

Если НАП, размещенные на БЛА и ОИС находятся достаточно близко друг к другу, то измерения псевдодальности, выполненные приемником ОИС и

НАП для одного и того же НКА, будут содержать одинаковые значения медленно меняющихся составляющих погрешности измерений. Поскольку координаты ОИС известны точно, то сравнивая их значения со значениями координат, вычисленными по принятым сигналам НКА, можно определить величины этих систематических ошибок, которые называют дифференциальными поправками (ДП). Передавая эти ДП в НАП по линии связи, можно использовать их для коррекции координат НАП.

В НАП определяется псевдодальность до НКА $R = R_0 + \delta R$, которая отличается от истинной дальности R_0 на величину погрешности δR , определяемой согласно (1) с учетом влияния ионосферных неоднородностей крупных $\Delta R_{ик}$ и средних $\Delta R_{ис}$ масштабов (2б) как

$$\delta R = \delta R_{и} + \Delta R_{ик} + \Delta R_{ис} + \delta R_{т} + \delta R_{мл} + \delta R_{ш} + \delta R_{шв} + \delta R_{др}. \quad (64a)$$

В ОИС определяется псевдодальность до НКА $R_{оис} = R_0 + \delta R_{оис}$, которая отличается от истинной дальности R_0 на величину погрешности $\delta R_{оис}$, определяемой аналогично (64а):

$$\delta R_{оис} = \delta R_{и оис} + \Delta R_{ик оис} + \Delta R_{ис оис} + \delta R_{т оис} + \delta R_{мл оис} + \delta R_{ш оис} + \delta R_{шв оис} + \delta R_{др оис}. \quad (64б)$$

В НАП измеренные псевдодальности $R = R_0 + \delta R$ корректируются полученными в ОИС дифференциальными поправками ($\delta R_{оис}$), в результате чего формируется скорректированная оценка псевдодальности

$$R_{кор} = R_0 + \delta R - \delta R_{оис} = R_0 + (\delta R_{и} - \delta R_{и оис}) + (\Delta R_{ик} - \Delta R_{ик оис}) + (\Delta R_{ис} - \Delta R_{ис оис}) + (\delta R_{т} - \delta R_{т оис}) + (\delta R_{мл} - \delta R_{мл оис}) + (\delta R_{ш} - \delta R_{ш оис}) + (\delta R_{шв} - \delta R_{шв оис}) + (\delta R_{др} - \delta R_{др оис}). \quad (65)$$

Известно [15, 17], что в силу пространственно-временной коррелированности погрешностей, обусловленных влиянием ионосферы (однородной), тропосферы, смещением шкал времени и других факторов выполняются равенства: $\delta R_{и} = \delta R_{и оис}$, $\delta R_{т} = \delta R_{т оис}$, $\delta R_{шв} = \delta R_{шв оис}$ и $\delta R_{др} = \delta R_{др оис}$. Если трассы РРВ от НКА (см. рис. 7) до НАП и ОИС проходят через ионосферу на расстоянии, не превышающем размера среднemasштабных неоднородностей, то можно считать, что выполняются равенства $\Delta R_{ик} = \Delta R_{ик оис}$ и $\Delta R_{ис} = \Delta R_{ис оис}$. Поэтому в выражении (65) компенсируются все составляющие погрешности, кроме многолучевой и шумовой, и оно сводится к виду

$$R_{кор} = R_0 + (\delta R_{мл} - \delta R_{мл оис}) + (\delta R_{ш} - \delta R_{ш оис}) = R_0 + \delta R_{кор}. \quad (66)$$

Напомним, что при размещении НАП СРНС на БЛА влияние многолучевого переотражения радиоволн от Земли практически устраняется ($\delta R_{мл} \approx 0$), но в наземной ОИС многолучевая составляющая погрешности может быть существенной ($\delta R_{мл оис} > 0$). Поэтому в худшем случае, когда все составляющие погрешности (66) складываются, будем иметь

$$R_{кор} = R_0 + \delta R_{мл оис} + \delta R_{ш} + \delta R_{ш оис} = R_0 + \delta R_{мл оис} + \delta R_{ш кор} = R_0 + \delta R_{кор}. \quad (67)$$

Поскольку шумовые погрешности приемников НАП ($\delta R_{ш}$) и ОИС ($\delta R_{ш\text{ оис}}$) являются случайными и независимыми, то шумовая составляющая $\delta R_{ш\text{ кор}} = \delta R_{ш} + \delta R_{ш\text{ оис}}$ скорректированной погрешности $\delta R_{кор} = \delta R_{мл\text{ оис}} + \delta R_{ш\text{ кор}}$ описывается выражением

$$\sigma_{R\text{ кор}} = \left(\overline{\delta R_{ш\text{ кор}}^2} \right)^{0,5} = \left(\overline{(\delta R_{ш})^2} + \overline{(\delta R_{ш\text{ оис}})^2} \right)^{0,5} = \left(\sigma_R^2 + \sigma_{R\text{ оис}}^2 \right)^{0,5}. \quad (68)$$

При одинаковых шумовых погрешностях измерения псевдодальности одночастотных НАП и ОИС ($\sigma_R^2 = \sigma_{R\text{ оис}}^2$), описываемых выражением (50), скорректированная погрешность определения псевдодальности в дифференциальном режиме работы будет определяться как

$$\begin{aligned} \delta R_{кор} &= \delta R_{ш\text{ кор}} + \delta R_{мл\text{ оис}} \equiv \sigma_{R\text{ кор}} + \delta R_{мл\text{ оис}} = \left(\sigma_R^2 + \sigma_{R\text{ оис}}^2 \right)^{0,5} + \delta R_{мл\text{ оис}} = \\ &= \sigma_R \sqrt{2} + \delta R_{мл\text{ оис}} = \left(\overline{E_r} / N_0 \right)^{0,5} \sqrt{\pi \Delta F_0}^{-1} c + \delta R_{мл\text{ оис}}. \end{aligned} \quad (69)$$

В общем случае условия возникновения ЧСЗ принимаемых сигналов одночастотных НАП и ОИС, описываемых выражением (49), скорректированная погрешность определения псевдодальности в дифференциальном режиме работы будет определяться как

$$\begin{aligned} \delta R_{кор(ч)} &= \sigma_{R(ч)} \sqrt{2} + \delta R_{мл\text{ оис}} = \sigma_R \mu_{ч}^{-1} \sqrt{2} + \delta R_{мл\text{ оис}} = \\ &= \left(\overline{E_r} / N_0 \right)^{0,5} \sqrt{\pi \Delta F_0}^{-1} c \mu_{ч}^{-1} + \delta R_{мл\text{ оис}}, \end{aligned} \quad (70)$$

где коэффициент $\mu_{ч}^{-1} = \psi(\Delta F_0 / \Delta F_k) \geq 1$ описывается выражением (51). В частном случае отсутствия СКО мелкомасштабных флуктуаций ПЭС в ионосфере ($\sigma_{\Delta N_T} = 0$) или при увеличении СКО мелкомасштабных флуктуаций ПЭС в ионосфере $\sigma_{\Delta N_T}$ до значений, при которых выполняется условие (45) возникновения рэлеевских замираний принимаемых сигналов, коэффициент $\mu_{ч} = 1$ и выражение (70) сводится к виду (69).

Таким образом, разработана методика оценки влияния мелкомасштабных неоднородностей ионосферы на погрешность определения псевдодальности одночастотной НАП СРНС на БЛА в дифференциальном режиме работы, включающая 2 этапа:

1) обоснование скорректированной погрешности определения псевдодальности в дифференциальной НАП в виде суммы (66, 67) шумовой и многолучевой составляющих $\delta R_{кор} = \delta R_{ш} + \delta R_{ш\text{ оис}} + \delta R_{мл\text{ оис}}$;

2) установление аналитической зависимости скорректированной погрешности определения псевдодальности в дифференциальном режиме (70) $\delta R_{кор(ч)} = \sigma_R \mu_{ч}^{-1} \sqrt{2} + \delta R_{мл\text{ оис}}$ от коэффициента (51) $\mu_{ч}^{-1} = \psi(\Delta F_0 / \Delta F_k)$ увеличения СКО шумовой погрешности определения псевдодальности (50) $\sigma_R = \psi(\overline{E_r} / N_0, \Delta F_0)$ в каналах с рэлеевскими замираниями (или без замираний) по мере увеличения степени ЧСЗ ($\Delta F_0 / \Delta F_k$) принимаемых сигналов.

В результате разработки методики установлена аналитическая зависимость $\delta R_{\text{кор(ч)}} = \psi(f_0, F_0, \bar{E}_r/N_0, \sigma_{\Delta N_T})$ скорректированной погрешности определения псевдодальности в дифференциальном режиме работы одночастотной НАП СРНС от частотных параметров передаваемых сигналов СРНС (несущей частоты f_0 и полосы спектра F_0), отношения сигнал/шум \bar{E}_r/N_0 на входе приемника и среднеквадратического отклонения мелкомасштабных флуктуаций ПЭС ионосферы $\sigma_{\Delta N_T}$ виде совокупности выражений (70, 51).

5. Прогнозирование погрешности измерения псевдодальности в различных режимах работы НАП СРНС в условиях возмущений ионосферы

5.1. Анализ изменений ПЭС при возмущениях ионосферы с учетом неоднородностей различных масштабов

Анализ полученных выше результатов определения погрешности измерения псевдодальности НАП СРНС в различных режимах работы (одночастотном, двухчастотном и дифференциальном) показывают, что они могут существенно возрастать при возмущениях ионосферы, сопровождаемых увеличением отклонений ПЭС (5) в неоднородностях крупных $\Delta N_{T_k}(\rho)$, средних $\Delta N_{T_c}(\rho)$ и мелких $\Delta N_{T_m}(\rho)$ масштабов относительно среднего значения \bar{N}_T . Поэтому для прогнозирования погрешности измерения псевдодальности НАП СРНС в условиях возмущений ионосферы необходимо, прежде всего, обосновать интервалы возможных приращений ПЭС ($\Delta N_{T_k}(\rho)$, $\Delta N_{T_c}(\rho)$ и $\Delta N_{T_m}(\rho)$).

Напомним, что усредненное по всем сезонам значение ПЭС ионосферы в средних широтах составляет $\bar{N}_T \approx 10^{17}$ эл/м² = 10 TECU ночью и $\bar{N}_T \approx 5 \cdot 10^{17}$ эл/м² = 50 TECU днем [23]. В арктических и экваториальных широтах среднее значение ПЭС не изменяется по сравнению со средними широтами, т.е. $\bar{N}_T \approx 10 \dots 50$ TECU [23], но наблюдаются вариации ПЭС крупных и средних масштабов, которые достигают следующих значений [6]: $\Delta N_{T_k} = 1 \dots 5$ TECU; $\Delta N_{T_c} = 0,2 \dots 2$ TECU. Поэтому дополнительные к $\bar{N}_T \approx 10 \dots 50$ TECU вариации ПЭС составляют $\Delta N_{T_k} + \Delta N_{T_c} = 1,2 \dots 7$ TECU и фоновое значение ПЭС при ЕВИ лежит в интервале

$$\bar{N}_T(\rho) = \bar{N}_T + \Delta N_{T_k}(\rho) + \Delta N_{T_c}(\rho) \approx 1,2 \dots 57 \text{ TECU.} \quad (71)$$

Проанализируем изменения мелкомасштабных флуктуаций ПЭС ионосферы, характеризуемые величиной СКО $\sigma_{\Delta N_T} = \left(\overline{\Delta N_{T_m}^2(\rho)} \right)^{0,5}$, в условиях средних, арктических и экваториальных широт.

Известно [8], что в среднеширотной ионосфере отношение СКО мелко-масштабных флуктуаций ЭК $\sigma_{\Delta N}(h) = \left(\overline{\Delta N_m^2(\rho, h)}\right)^{0,5}$ к среднему их значению $\overline{N(h)}$, называемое интенсивностью неоднородностей β_n , остается практически постоянным на любой высоте h , включая высоту максимальной ионизации $h = h_m$

$$\beta_n = \frac{\left(\overline{\Delta N_m^2(\rho, h)}\right)^{0,5}}{\overline{N(h)}} = \frac{\sigma_{\Delta N}(h)}{\overline{N(h)}} = \frac{\sigma_{\Delta N}(h_m)}{\overline{N(h_m)}} = \frac{\sigma_{\Delta N}}{\overline{N_m}} \approx \text{const}(h), \quad (72)$$

Согласно экспериментальным данным [23] условиях среднеширотной ионосферы интенсивность мелкомасштабных неоднородностей составляет $\beta_n \approx 3 \cdot 10^{-3}$ днем и $\beta_n \approx 10^{-2}$ ночью, а полярных и экваториальных широтах она достигает значений $\beta_n \approx 0,1$ и $\beta_n \approx 0,2$ соответственно.

Более удобно по сравнению с выражением (72) интенсивность мелкомасштабных неоднородностей измерять через отношение СКО мелкомасштабных флуктуаций ПЭС $\sigma_{\Delta N_T} = \left(\overline{\Delta N_{Tm}^2(\rho)}\right)^{0,5}$ к среднему значению $\overline{N_T}$, как [29]

$$\beta_n = \left(\sigma_{\Delta N_T} / \overline{N_T}\right) \left(h_3 \sec \alpha / \sqrt{\pi l_s}\right)^{0,5}, \quad (73)$$

где l_s – характерный (средний) размер мелкомасштабных неоднородностей ЭК ионосферы.

Если среднее значение ПЭС определять с учетом не только однородного фона $\overline{N_T}$, но и вариаций крупного и среднего масштабов согласно (5) $\overline{N_T(\rho)} = \overline{N_T} + \Delta N_{T_k}(\rho) + \Delta N_{T_c}(\rho)$, то выражение (73) преобразуется к виду

$$\beta_n = \frac{\sigma_{\Delta N_T}}{\overline{N_T(\rho)}} \left(\frac{h_3 \sec \alpha}{\sqrt{\pi l_s}}\right)^{0,5} = \frac{\sigma_{\Delta N_T}}{\overline{N_T} + \Delta N_{T_k}(\rho) + \Delta N_{T_c}(\rho)} \left(\frac{h_3 \sec \alpha}{\sqrt{\pi l_s}}\right)^{0,5}.$$

Отсюда следует выражение для определения СКО мелкомасштабных флуктуаций ПЭС в ионосфере

$$\sigma_{\Delta N_T} = \beta_n \left(\overline{N_T} + \Delta N_{T_k}(\rho) + \Delta N_{T_c}(\rho)\right) \left(\frac{\sqrt{\pi l_s}}{h_3 \sec \alpha}\right)^{0,5}. \quad (74)$$

Напомним, что ранее указывались значения следующих параметров ионосферы: $\overline{N_T} = N_T \approx 10 \dots 50$ TECU; $\Delta N_{T_k} = 1 \dots 5$ TECU, $\Delta N_{T_c} = 0,2 \dots 2$ TECU, $h_3 = (4 \dots 5) \cdot 10^5$ м. Если в качестве характерного размера мелкомасштабных неоднородностей принять $l_s = 400$ м, то согласно (74) с учетом значений $\beta_n \approx 3 \cdot 10^{-3}$ днем и $\beta_n \approx 10^{-2}$ ночью при $\alpha = 0^\circ$ СКО мелкомасштабных флуктуаций ПЭС в среднеширотной ионосфере составляет $\sigma_{\Delta N_T} \approx (1,3 \dots 7) \cdot 10^{-2}$ TECU днем и $\sigma_{\Delta N_T} \approx 0,04 \dots 0,2$ TECU ночью. В полярных и экваториальных широтах (с учетом значений $\beta_n \approx 0,1$ и $\beta_n \approx 0,2$) СКО мел-

комасштабных флуктуаций ПЭС составляет $\sigma_{\Delta N_T} \approx 0,4...2$ TECU и $\sigma_{\Delta N_T} \approx 0,8...4$ TECU соответственно.

Для условий искусственных возмущений ионосферы (например, в результате инъекции легкоионизирующихся химических веществ типа бария) известно [12], что СКО флуктуаций фазового фронта волны на выходе ионосферы (33) $\sigma_\varphi \approx 80,8\pi\sigma_{\Delta N_T} \sqrt{\sec\alpha} / cf_0$ при $\alpha = 0^\circ$ и $f_0 \approx 1,4$ ГГц достигает значений $\sigma_\varphi = 100...500$ рад. При несущей частоте $f_0 \approx 1,6$ ГГц это соответствует увеличению СКО мелкомасштабных флуктуаций ПЭС до значений $\sigma_{\Delta N_T} \approx 14...70$ TECU.

Отметим, что в настоящее время вариации ПЭС крупных и средних масштабов в условиях искусственных возмущений ионосферы, обусловленных инъекцией легкоионизирующихся химических веществ, исследованы недостаточно полно. Поэтому будем считать, что в этих условиях ПЭС ионосферы не изменяется по сравнению со случаем естественных возмущений ионосферы в области арктических и экваториальных широт, т.е. вариации ПЭС крупных и средних масштабов имеют значения [6] $\Delta N_{T_k} = 1...5$ TECU; $\Delta N_{T_c} = 0,2...2$ TECU и фоновое значение ПЭС лежит в интервале (71) $\overline{N_T}(\rho) \approx 1,2...57$ TECU.

Проведенный анализ изменения ПЭС при возмущениях ионосферы позволяет сделать следующие выводы

1) в нормальной среднеширотной ионосфере изменения среднего значения ПЭС составляют $\overline{N_T} \approx 10...50$ TECU, а СКО мелкомасштабных флуктуаций – $\sigma_{\Delta N_T} \approx 10^{-2}...0,2$ TECU;

2) естественные возмущения ионосферы в области арктических и экваториальных широт характеризуются возрастанием фонового значения ПЭС до $\overline{N_T}(\rho) = \overline{N_T} + \Delta N_{T_k}(\rho) + \Delta N_{T_c}(\rho) \approx 11,2...57$ TECU за счет появления крупно- и среднемасштабных неоднородностей и увеличением СКО мелкомасштабных флуктуаций ПЭС до значений $\sigma_{\Delta N_T} \approx 0,4...4$ TECU;

3) искусственные возмущения ионосферы могут приводить к возрастанию СКО мелкомасштабных флуктуаций ПЭС до значений $\sigma_{\Delta N_T} \approx 14...70$ TECU при неизменном фоновом значении ПЭС $\overline{N_T}(\rho) \approx 11,2...57$ TECU.

5.2. Прогнозирование погрешности одночастотных измерений псевдодалности при возмущениях ионосферы

В соответствии с установленными интервалами возможных приращений параметров ПЭС ионосферы (среднего значения $\overline{N_T}(\rho)$ и СКО мелкомасштабных флуктуаций $\sigma_{\Delta N_T}$) и можно осуществить прогнозирование погрешности измерения псевдодалности в одночастотной, двухчастотной и дифференциальной НАП СРНС в условиях естественных (ЕВИ) и искусственных (ИВИ) воз-

мущений ионосферы в соответствии с полученными аналитическими зависимостями (52, 62, 70):

$$\delta R = \overline{\delta R_{и}} + \sigma_{R\mu_{ч}^{-1}}; \quad \sigma_{R(ч)}(2f) = \sigma_{R\mu_{ч}^{-1}}(2f); \quad \delta R_{кор(ч)} = \sigma_{R\mu_{ч}^{-1}}\sqrt{2} + \delta R_{мл\text{ онс}}.$$

Здесь ионосферная составляющая погрешности (26б) $\overline{\delta R_{и}} = \psi(f_0, \overline{N_T}(\rho))$ определяется средним (фоновым) значением ПЭС ионосферы $\overline{N_T}(\rho)$, а шумовые составляющие определяются произведением шумовой погрешности определения псевдодалности (50) $\sigma_R = \psi(\overline{E_r}/N_0, \Delta F_0)$ на коэффициент ее увеличения (51) $\mu_{ч}^{-1} = \psi(\Delta F_0/\Delta F_k) = \psi(\Delta F_0, f_0, \sigma_{\Delta N_T})$ из-за ЧСЗ принимаемых сигналов.

На рис. 8 приведены зависимости полосы когерентности трансionoсферного канала на несущих частотах $f_0 = f_{02} = 1,6$ ГГц и $f_{01} = 1,2$ ГГц, построенные согласно выражению (36) $\Delta F_k(f_0) = \psi(f_0, \sigma_{\Delta N_T}, \alpha, D_1(f_0))$ при угле $\alpha = 0^\circ$ и параметрах (34, 35) $D_1(f_{02}) \approx 5,1$ и $D_1(f_{01}) \approx 6,7$, от СКО мелкомасштабных флуктуаций ПЭС в ионосфере в диапазоне $\sigma_{\Delta N_T} = 0,1 \dots 100$ ТЕСУ.

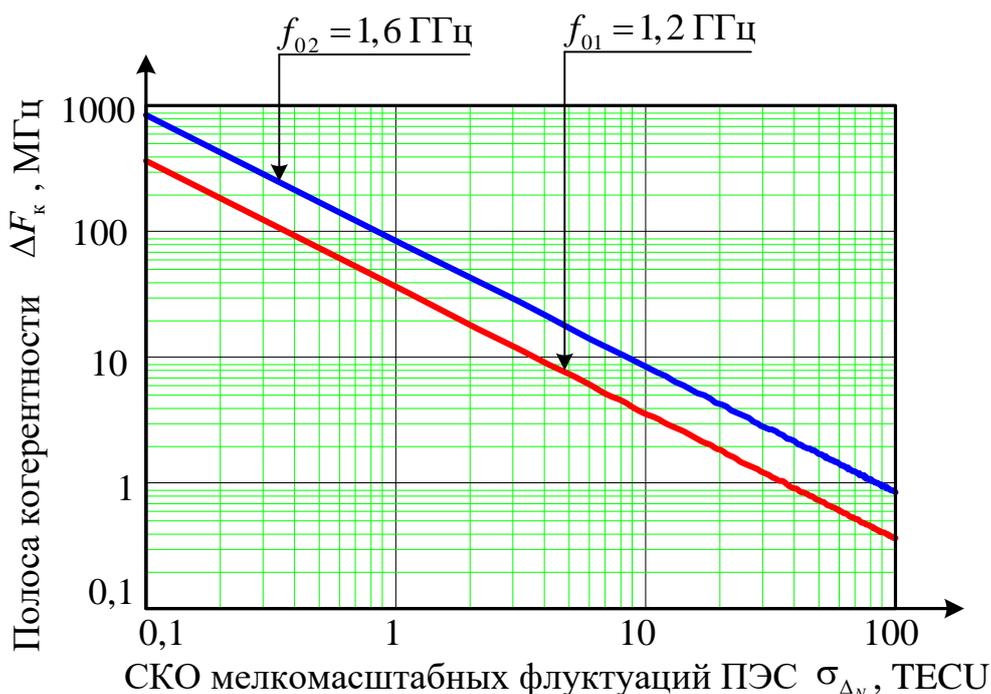


Рис. 8. Зависимость полосы когерентности трансionoсферного канала от СКО мелкомасштабных флуктуаций ПЭС в ионосфере при несущих частотах $f_0 = f_{02} = 1,6$ ГГц и $f_{01} = 1,2$ ГГц

Согласно рис. 8 при увеличении СКО мелкомасштабных флуктуаций ПЭС в ионосфере до значений $\sigma_{\Delta N_T} \geq 4$ ТЕСУ полоса когерентности трансionoсферного канала на частоте $f_{01} = 1,2$ ГГц сужается до $\Delta F_k \leq 10$ МГц и для широкой полосы $\Delta F_0 = \Delta F_{0ш} = 10$ МГц выполняется условие (47) $\Delta F_0 \geq \Delta F_k$ возникновения ЧСЗ, при котором коэффициент $\mu_{ч}^{-1} = \psi(\Delta F_0/\Delta F_k) = \psi(\Delta F_0, f_0, \sigma_{\Delta N_T}) > 1$.

В соответствии с рис. 8 и полученными аналитическими выражениями на рис. 9 приведены графики зависимости увеличения погрешности измерения псевдодальности в одночастотной (52) $\delta R = \overline{\delta R_{и}} + \sigma_{R(ч)}$, двухчастотной (62) $\delta R = \sigma_{R(ч)}(2f)$ и дифференциальной (70) $\delta R_{кор} = \delta R_{кор(ч)}$ НАП СРНС по мере возрастания СКО мелкомасштабных флуктуаций ПЭС $\sigma_{\Delta N_T}$ в условиях естественных (ЕВИ) и искусственных (ИВИ) возмущений ионосферы.

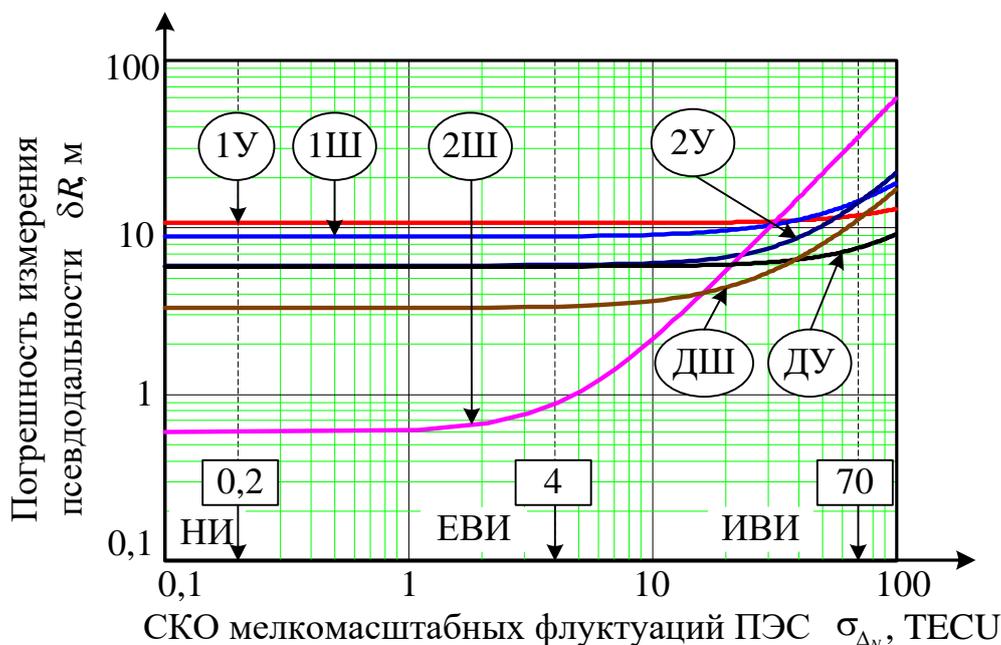


Рис. 9. Зависимости погрешности измерения псевдодальности в СРНС от изменения мелкомасштабных флуктуаций ПЭС ионосферы

Кривые 1У и 1Ш отражают зависимости (52, 26, 49-51) погрешности измерения псевдодальности $\delta R = \overline{\delta R_{и}} + \sigma_{R(ч)}$ в одночастотной ($f_0 = f_{02} \approx 1,6$ ГГц) НАП СРНС от возрастания СКО мелкомасштабных флуктуаций ПЭС в условиях ЕВИ (в диапазоне $\sigma_{\Delta N_T} = 0,1 \dots 4$ TECU) и в условиях ИВИ (в диапазоне $\sigma_{\Delta N_T} = 0,1 \dots 70$ TECU). Они построены для случаев передачи сигналов с узкой полосой спектра $\Delta F_{0y} = 1$ МГц (кривая 1У) и широкой $\Delta F_{0ш} = 10$ МГц (кривая 1Ш) при максимальном среднем (фоновом) значении ПЭС ионосферы $\overline{N_T}(\rho) = 7$ TECU, угле $\alpha = 0^\circ$ и отношении $\overline{h^2} = \overline{E_r}/N_0 = 35$ дБ. Согласно рис. 9 в условиях ЕВИ ($\sigma_{\Delta N_T} \leq 4$ TECU) погрешность измерения псевдодальности в одночастотной НАП уменьшается с $\delta R_y \approx 10,6$ м до $\delta R_{ш} \approx 8,8$ м при расширении спектра сигналов с $\Delta F_{0y} = 1$ МГц до $\Delta F_{0ш} = 10$ МГц. Эти погрешности примерно на 1 м превосходят погрешности в условиях НИ ($\delta R_y \approx 9,5$ м и $\delta R_{ш} \approx 7,7$ м при $\sigma_{\Delta N_T} = 0,2$ TECU) из-за появления при ЕВИ крупно- и среднемасштабных вариаций ПЭС (мелкомасштабные флуктуации ПЭС в условиях ЕВИ с СКО

$\sigma_{\Delta N_T} \leq 4$ TECU на δR практически не влияют). В условиях ИВИ возрастание мелкомасштабных флуктуаций ПЭС до максимального значения $\sigma_{\Delta N_T} = 70$ TECU обуславливает увеличение погрешности измерения псевдодальности до значений $\delta R_y = \overline{\delta R_n} + \sigma_{R(ч)y} \approx 11,8$ м и $\delta R_{ш} = \overline{\delta R_n} + \sigma_{R(ч)ш} \approx 14,4$ м при $\Delta F_{0y} = 1$ МГц и $\Delta F_{0ш} = 10$ МГц. Это объясняется сужением полосы когерентности трансionoсферного канала согласно рис. 8 до $\Delta F_k < 1,2$ МГц, возрастанием степени ЧСЗ ($\Delta F_0 / \Delta F_k$) и шумовой составляющей погрешности измерения псевдодальности на величину (49) $\sigma_{R(ч)y} \approx 3,2$ м при $\Delta F_{0y} = 1$ МГц и $\sigma_{R(ч)ш} \approx 5,8$ м при $\Delta F_{0ш} = 10$ МГц.

Кривые 2У и 2Ш отражают зависимости (62, 49, 51, 63) погрешности измерения псевдодальности $\delta R(2f)$ в двухчастотной ($f_{02} \approx 1,6$ ГГц и $f_{01} \approx 1,2$ ГГц) НАП СРНС от возрастания СКО мелкомасштабных флуктуаций ПЭС в условиях в диапазоне 0,1...0,2 TECU, ЕВИ в диапазоне $\sigma_{\Delta N_T} = 0,1...4$ TECU и в условиях ИВИ в диапазоне $\sigma_{\Delta N_T} = 0,1...70$ TECU. Поскольку $\delta R(2f)$ не зависят от ионосферной составляющей $\delta R_n(2f) = 0$, они определяются шумовой составляющей (62) $\delta R(2f) = \sigma_{R(ч)}(2f)$ и построены при $\alpha = 0^\circ$, $\overline{h^2} = \overline{E_r} / N_0 = 35$ дБ для случаев $\Delta F_{0y} = 1$ МГц (кривая 2У) и $\Delta F_{0ш} = 10$ МГц (кривая 2Ш). Согласно рис. 9 в условиях НИ ($\sigma_{\Delta N_T} = 0,2$ TECU) погрешность измерения псевдодальности в двухчастотной НАП уменьшается с $\delta R(2f)_y \approx 6$ м до $\delta R(2f)_{ш} \approx 0,6$ м при расширении спектра сигналов с $\Delta F_{0y} = 1$ МГц до $\Delta F_{0ш} = 10$ МГц. В условиях ЕВИ ($\sigma_{\Delta N_T} = 4$ TECU) погрешность измерения псевдодальности остается неизменной $\delta R(2f)_y \approx 6$ м при $\Delta F_{0y} = 1$ МГц и возрастает до $\delta R(2f)_{ш} \approx 1$ м при $\Delta F_{0ш} = 10$ МГц из-за появления ЧСЗ принимаемых сигналов ($\Delta F_{0ш} / \Delta F_k > 1$). В условиях ИВИ возрастание мелкомасштабных флуктуаций ПЭС до максимального значения $\sigma_{\Delta N_T} = 70$ TECU обуславливает увеличение погрешности измерения псевдодальности до значений $\delta R(2f)_y = \sigma_{R(ч)}(2f)_y \approx 14,1$ м при $\Delta F_{0y} = 1$ МГц и $\delta R(2f)_{ш} = \sigma_{R(ч)}(2f)_{ш} \approx 35$ м при $\Delta F_{0ш} = 10$ МГц. Это обусловлено сужением полосы когерентности (рис. 8) трансionoсферного канала до $\Delta F_k \approx 1,2...0,5$ МГц и появлением сильных ЧСЗ ($\Delta F_{0ш} / \Delta F_k \gg 1$) принимаемых сигналов. Таким образом, применение двухчастотных НАП обеспечивает заметное снижение погрешности измерения псевдодальности в условиях ЕВИ ($\delta R(2f)_y \approx 6$ м; $\delta R(2f)_{ш} \approx 0,6$ м) по сравнению с одночастотными НАП ($\delta R_y \approx 10,6$ м; $\delta R_{ш} \approx 8,8$ м) и значительное повышение этой погрешности в условиях ИВИ ($\delta R(2f)_y \approx 14,1$ м; $\delta R(2f)_{ш} \approx 35$ м).

Кривые ДУ и ДШ отражают зависимости (70, 49-51) скорректированной погрешности измерения псевдодальности $\delta R_{кор} = \sigma_{R(ч)} \sqrt{2} + \delta R_{мл\ оис}$ в дифферен-

циальном режиме работы ($f_{02} \approx 1,6$ ГГц) НАП СРНС от возрастания СКО мелкомасштабных флуктуаций ПЭС в условиях НИ в диапазоне $0,1 \dots 0,2$ ТЕСУ, ЕВИ в диапазоне $\sigma_{\Delta N_T} = 0,1 \dots 4$ ТЕСУ и в условиях ИВИ в диапазоне $\sigma_{\Delta N_T} = 0,1 \dots 70$ ТЕСУ. В идеальном случае $\delta R_{\text{кор}}$ не зависят от ионосферной составляющей ($\delta R_{\text{и}} = 0$) и определяется шумовой ($\sigma_{R(\text{ш})}$) и многолучевой ($\delta R_{\text{мл оис}}$) составляющей (70). Кривые ДУ и ДШ построены при $\alpha = 0^\circ$, $\bar{h}^2 = \bar{E}_r / N_0 = 35$ дБ для случаев $\Delta F_{0y} = 1$ МГц и $\Delta F_{0ш} = 10$ МГц соответственно. Согласно рис. 9 в условиях ЕВИ ($\sigma_{\Delta N_T} = 4$ ТЕСУ) погрешность измерения псевдодальности в дифференциальной одночастотной НАП уменьшается с $\delta R_{\text{кор у}} \approx 5,8$ м до $\delta R_{\text{кор ш}} \approx 3,4$ м при расширении спектра сигналов с $\Delta F_{0y} = 1$ МГц до $\Delta F_{0ш} = 10$ МГц. Эти погрешности примерно равны погрешностям в условиях НИ ($\delta R_{\text{кор у}} \approx 5,8$ м и $\delta R_{\text{кор ш}} \approx 3,3$ м. В условиях ИВИ возрастание мелкомасштабных флуктуаций ПЭС до максимального значения $\sigma_{\Delta N_T} = 70$ ТЕСУ обуславливает увеличение погрешности измерения псевдодальности до значений $\delta R_{\text{кор у}} = \sigma_{R(\text{ш})} \sqrt{2} + \delta R_{\text{мл оис}} \approx 7,5$ м и $\delta R_{\text{кор ш}} = \sigma_{R(\text{ш})} \sqrt{2} + \delta R_{\text{мл оис}} \approx 11,2$ м при $\Delta F_{0y} = 1$ МГц и $\Delta F_{0ш} = 10$ МГц. Это объясняется сужением полосы когерентности трансionoсферного канала согласно рис. 8 до $\Delta F_{\text{к}} < 1,2$ МГц, возрастанием степени ЧСЗ ($\Delta F_0 / \Delta F_{\text{к}}$) и шумовой составляющей погрешности измерения псевдодальности на величину $\sigma_{R(\text{ш})} \approx 3,3$ м при $\Delta F_{0y} = 1$ МГц и $\sigma_{R(\text{ш})} \approx 5,8$ м при $\Delta F_{0ш} = 10$ МГц.

Таким образом, применение дифференциальных НАП обеспечивает заметное снижение погрешности измерения псевдодальности в условиях ЕВИ ($\delta R_{\text{кор у}} \approx 5,8$ м; $\delta R_{\text{кор ш}} \approx 3,4$ м) по сравнению с одночастотными НАП ($\delta R_{\text{у}} \approx 10,6$ м; $\delta R_{\text{ш}} \approx 8,8$ м) и значительное снижение этой погрешности в условиях ИВИ ($\delta R_{\text{кор у}} \approx 7,5$ м; $\delta R_{\text{кор ш}} \approx 11,2$ м) по сравнению с двухчастотными НАП ($\delta R(2f)_{\text{у}} \approx 14,1$ м; $\delta R(2f)_{\text{ш}} \approx 35$ м).

Для сравнительного анализа увеличения погрешности измерения псевдодальности при наклонном распространении радиоволн ($\alpha \approx 70^\circ$) по сравнению с вертикальным ($\alpha \approx 0^\circ$) распространением (рис. 9) приведен рис. 10.

Следует отметить, что в случае наклонного распространения радиоволн через ионосферу под углом $\alpha \approx 70^\circ$ приведенные на рис. 10 погрешности измерения псевдодальности (δR) в НАП СРНС увеличатся при тех же значениях статистических характеристик ПЭС в ионосфере.

Сравнительный анализ рис. 9 и рис. 10 показывает, что в условиях НИ ($\sigma_{\Delta N_T} \leq 0,2$ ТЕСУ) погрешности определения псевдодальности практически не изменяются по сравнению со случаем нормального распространения радиоволн. Исключение составляет одночастотный режим работы НАП, при котором

погрешности возрастают примерно в три раза (кривые 1У, 1Ш) до значений $\delta R_y \approx 26,1$ м и $\delta R_{ш} \approx 24,3$ м.

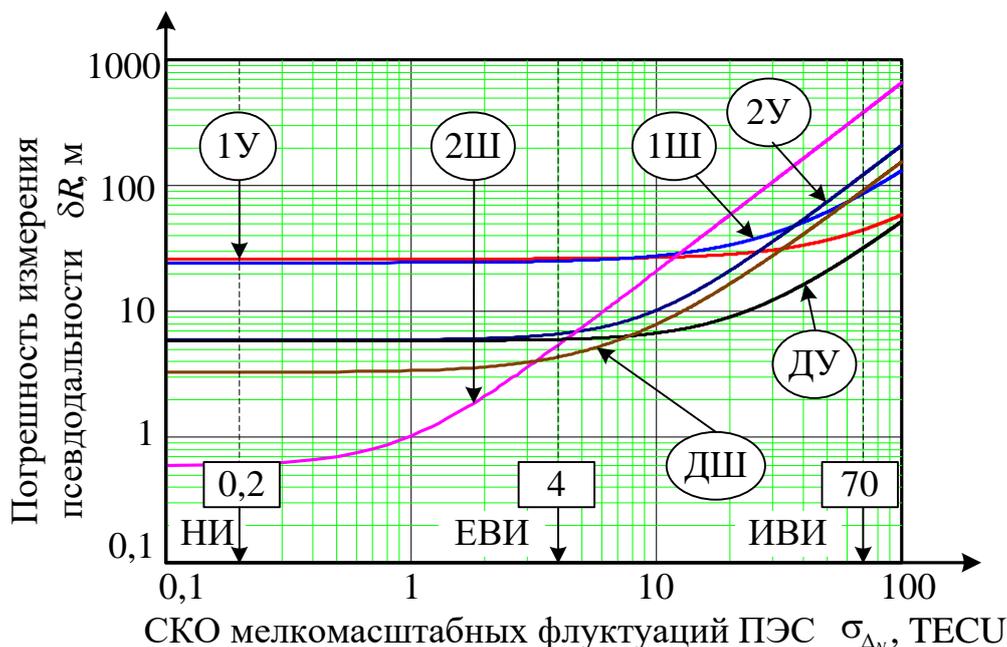


Рис. 10. Зависимости погрешности измерения псевдодалности в СРНС от изменения параметров ПЭС в ионосфере при наклонном распространении радиоволн ($\alpha \approx 70^\circ$)

В условиях ЕВИ ($\sigma_{\Delta N_T} = 4$ TECU) погрешности определения псевдодалности для двухчастотной НАП (кривая 2У) и дифференциальном режиме работы НАП (кривая ДУ), использующих передачу с узкой полосой спектра $\Delta F_{0y} = 1$ МГц, увеличиваются незначительно, за исключением одночастотной НАП (кривая 1У), погрешность которой возрастет в 2,46 раз ($\delta R_y \approx 26,1$ м против $\delta R_y \approx 10,6$ м). Погрешности определения псевдодалности для одночастотной НАП (кривая 1Ш), двухчастотной НАП (кривая 2Ш) и дифференциальном режиме работы НАП (кривая ДШ), использующих передачу с широкой полосой спектра $\Delta F_{0ш} = 10$ МГц, увеличиваются в 2,8 раз, 6,2 и 1,3 соответственно по сравнению с нормальным распространением ($\delta R_{ш} \approx 25$ м против $\delta R_{ш} \approx 8,8$ м, $\delta R(2f)_{ш} \approx 5,4$ м против $\delta R(2f)_{ш} \approx 0,87$ м и $\delta R_{кор ш} \approx 4,3$ м против $\delta R_{кор ш} \approx 3,3$ м).

В условиях ИВИ возрастание мелкомасштабных флуктуаций ПЭС до максимального значения $\sigma_{\Delta N_T} = 70$ TECU обуславливает увеличение погрешности измерения псевдодалности при наклонном распространении для СРНС, использующих передачу с узкой полосой спектра $\Delta F_{0y} = 1$ МГц, до значений $\delta R_y \approx 44,6$ м, $\delta R(2f)_y \approx 122,9$ м и $\delta R_{кор y} \approx 32,1$ м (против $\delta R_y \approx 11,8$ м, $\delta R(2f)_y \approx 14,1$ м и $\delta R_{кор y} \approx 7,5$ м при $\alpha \approx 0^\circ$), что составляет 3,77 раз для одночастотной НАП, 8,7 раз для двухчастотной НАП и 4,28 раза для дифференциальном режиме работы НАП (кривые 1У, 2У и ДУ).

В условиях ИВИ для СРНС, использующих передачу с широкой полосой спектра $\Delta F_{0ш} = 10$ МГц наблюдается еще более существенное увеличение погрешности измерения псевдодальности. Погрешность составляет $\delta R_{ш} \approx 86,9$ м; $\delta R(2f)_{ш} \approx 384,4$ м и $\delta R_{кор ш} \approx 91,8$ м (против $\delta R_{ш} \approx 14,4$ м, $\delta R(2f)_{ш} \approx 35$ м и $\delta R_{кор ш} \approx 11,2$ при $\alpha \approx 0^\circ$), что составляет 6,03 раза для одночастотной НАП, 10,9 раз для двухчастотной НАП и 8,2 раза для дифференциальном режиме работы НАП (кривые 1Ш, 2Ш и ДШ).

Таким образом, применение двухчастотных НАП СРНС в сочетании с сигналами с широкой полосой ($\Delta F_{0ш} = 10$ МГц) в условиях нормальной ионосферы обеспечивает значительное уменьшение погрешности измерения псевдодальности (до $\delta R(2f)_{ш} = 0,6$ м) по сравнению с одночастотными НАП (где $\delta R_{ш} \approx 24$ м). Однако в условиях ИВИ эта погрешность может возрасти до значений $\delta R(2f)_{ш} \approx 384$ м, существенно превосходящих погрешность $\delta R_{ш} \approx 87$ м в этих условиях одночастотных НАП.

Заключение

Анализ полученных выше результатов позволяет сделать следующие выводы:

1. На основе качественного анализа и разработки модели ионосферы (рис. 1) и трансionoсферного РРВ (рис. 2) установлено, что крупно- и среднемасштабные вариации ПЭС ионосферы ($\Delta N_{Тк}(\rho)$, $\Delta N_{Тс}(\rho)$) обуславливают возрастание среднего значения ионосферной составляющей $\overline{\delta R_{и}}$ погрешности измерения псевдодальности $\delta R = \overline{\delta R_{и}} + \delta R_{ш}$ в одночастотной НАП СРНС, а мелкомасштабные флуктуации ПЭС ($\Delta N_{Тм}(\rho) \equiv \Delta N_{Т}(\rho_i)$) определяют относительное запаздывания приходящих лучей (10) $\Delta \tau_i \sim \Delta N_{Т}(\rho_i) / f_0^2$. Они обуславливают возникновение рэлеевских замираний амплитуды принимаемых сигналов (17-19) или их ЧСЗ (11-14), Последние сопровождаются искажениями формы огибающей принимаемых сигналов и обуславливают возрастание шумовой составляющей погрешности измерения псевдодальности $\delta R_{ш}$ одночастотной НАП СРНС.

2. Получена аналитическая зависимость (26б) $\overline{\delta R_{и}} = \psi(f_0, \overline{N_T}, \Delta N_{Тк}, \Delta N_{Тс})$ ионосферной составляющей погрешности измерения псевдодальности в одночастотной НАП СРНС от несущей частоты $f_0 = f_{02}$ сигнала и среднего (фонового) значения ПЭС ионосферы $\overline{N_T}(\rho) = \overline{N_T} + \Delta N_{Тк}(\rho) + \Delta N_{Тс}(\rho)$, учитывающего крупно- и среднемасштабные неоднородности ЭК.

3. Разработана методика оценки влияния мелкомасштабных неоднородностей ионосферы на погрешность определения псевдодальности одночастотной НАП СРНС, позволяющая установить аналитическую зависимость $\sigma_{R(ч)} = \psi(f_0, F_0, \overline{E_r} / N_0, \sigma_{\Delta N_T})$ шумовой составляющей погрешности измерения псевдодальности от частотных параметров передаваемых сигналов СРНС (не-

сущей частоты f_0 и полосы спектра F_0), отношения сигнал/шум \bar{E}_r/N_0 на входе приемника и среднеквадратического отклонения мелкомасштабных флуктуаций ПЭС ионосферы $\sigma_{\Delta N_T} = \left(\overline{\Delta N_T^2(\rho_i)} \right)^{0,5}$ в виде совокупности выражений (49-51).

4. Разработана методика оценки влияния мелкомасштабных неоднородностей ионосферы на погрешность определения псевдодальности двухчастотной НАП СРНС, позволяющая получить аналитическую зависимость $\sigma_{R(ч)}(2f) = \psi(f_{02}, f_{01}, F_0, \bar{E}_r/N_0, \sigma_{\Delta N_T})$ шумовой погрешности измерения псевдодальности от частотных параметров передаваемых сигналов СРНС (несущих частот f_{02} и f_{01} , полосы спектра F_0), отношения сигнал/шум \bar{E}_r/N_0 на входе приемника и среднеквадратического отклонения мелкомасштабных флуктуаций ПЭС в ионосфере $\sigma_{\Delta N_T}$ в виде совокупности выражений (62, 63, 50, 57, 58).

5. Разработана методика оценки влияния мелкомасштабных неоднородностей ионосферы на погрешность определения псевдодальности одночастотной НАП СРНС на БЛА в дифференциальном режиме работы, позволяющая получить аналитическую зависимость $\delta R_{\text{кор}(ч)} = \psi(f_0, F_0, \bar{E}_r/N_0, \sigma_{\Delta N_T})$ скорректированной погрешности определения псевдодальности от частотных параметров передаваемых сигналов СРНС (несущей частоты f_0 и полосы спектра F_0), отношения сигнал/шум \bar{E}_r/N_0 на входе приемника и среднеквадратического отклонения мелкомасштабных флуктуаций ПЭС ионосферы $\sigma_{\Delta N_T}$ в виде совокупности выражений (70, 51).

6. Сравнительный анализ результатов прогнозирования погрешности измерения псевдодальности в различных режимах работы НАП СРНС (одночастотном, двухчастотном и дифференциальном) в условиях возмущений ионосферы (рис. 9, 10) позволяет сделать следующие выводы:

1) в условиях естественных возмущений ионосферы в арктических и экваториальных широтах (когда мелкомасштабные флуктуации ПЭС $\sigma_{\Delta N_T} \leq 4$ TECU) применение двухчастотных и дифференциальных НАП, (обеспечивающих устранение ионосферной погрешности $\overline{\delta R_{\text{и}}} = 0$), в сочетании с передачей ФМ ШПС с широкой полосой $\Delta F_{0\text{ш}} = 10$ МГц (обеспечивающей уменьшение шумовой погрешности) позволяет существенно уменьшить погрешность измерения псевдодальности (до $\delta R(2f)_{\text{ш}} \approx 1$ м и $\delta R_{\text{кор ш}} \approx 3,3$ м) по сравнению с применением дифференциальной и двухчастотной НАП с узкополосными сигналами (когда $\delta R_{\text{кор у}} \approx 5,8$ м, $\delta R(2f)_y \approx 6$ м) или одночастотной НАП (когда $\delta R_{\text{ш}} \approx 8,8$ м, $\delta R_y \approx 10,6$ м);

2) в условиях наибольших искусственных возмущений ионосферы ($\sigma_{\Delta N_T} = 70$ TECU) применение двухчастотной НАП в сочетании с передачей ФМ ШПС с широкой полосой $\Delta F_{0\text{ш}} = 10$ МГц может вызывать значительное увеличение погрешности измерения псевдодальности (до $\delta R(2f)_{\text{ш}} \approx 35$ м) по сравнению

нию одночастотной ($\delta R_{\text{ш}} = 14,4$ м) и дифференциальной ($\delta R_{\text{кор ш}} = 11,2$ м) НАП. Это обусловлено сужением полосы когерентности транссионосферного канала до $\Delta F_{\text{к}} \approx 1,2 \dots 0,5$ МГц и появлением сильных ЧСЗ ($\Delta F_{\text{ош}} / \Delta F_{\text{к}} \gg 1$) принимаемых сигналов. Применение ФМ ШПС с узкой полосой $\Delta F_{\text{оу}} = 1$ МГц обеспечит уменьшение степени ЧСЗ принимаемых сигналов ($\Delta F_{\text{оу}} / \Delta F_{\text{к}} \sim 1$) и снижение погрешность измерения псевдодальности до $\delta R_{\text{у}}(2f) \approx 14,1$ м, $\delta R_{\text{у}} \approx 11,8$ м и $\delta R_{\text{кор у}} \approx 7,5$ м в двухчастотном, одночастотном и дифференциальных режимах работы НАП СРНС соответственно;

3) в случае наклонного распространения радиоволн через ионосферу под углом $\alpha \approx 70^\circ$ погрешности измерения псевдодальности (рис. 10) навигационной аппаратуры потребителей СРНС могут существенно увеличиться (в 4...11 раз) по сравнению с вертикальным распространением (рис. 9) при тех же значениях статистических характеристик ПЭС в ионосфере. Например, применение двухчастотной НАП СРНС в сочетании с сигналами с широкой полосой ($\Delta F_{\text{ош}} = 10$ МГц) в условиях искусственных возмущений ионосферы обуславливает увеличение погрешности измерения псевдодальности из-за ЧСЗ до значений $\delta R(2f)_{\text{ш}} \approx 384$ м, что существенно превосходит погрешность $\delta R_{\text{ш}} \approx 87$ м в этих условиях одночастотной НАП.

Исследования выполнены при поддержке научного проекта «Разработка роботизированного беспилотного летательного аппарата мультироторного типа с использованием бесплатформенной инерциальной навигационной системы» Федеральной Целевой Программы на 2014-2020 годы (уникальный идентификатор RFMEFI57818X0222) при финансовой поддержке Министерства Науки и Высшего Образования России с использованием оборудования «Аппаратно-программный комплекс пассивного мониторинга ионосферы NovAtel GPStation-6».

Литература

1. Верба В. С., Татарский Б. Г. Комплексы с беспилотными летательными аппаратами. Принципы построения и особенности применения комплексов с БЛА. – М.: Радиотехника, 2016. – 507 с.
2. Востриков О. В. Обоснование облика навигационной системы ударного беспилотного летательного аппарата // Труды Московского авиационного института. 2011. № 48. С. 1-10.
3. Горбачёв О. А. Навигационное обеспечение воздушных судов гражданской авиации в условиях возмущенной ионосферы: дис. ... докт. техн. наук: 05.22.13. – М.: МГТУГА, 2009. – 324 с.
4. Aarons J. Global Morphology of Ionospheric Scintillations // Proceedings of the Institute of Electrical and Electronic Engineers. 1982. № 4 (70). P. 360-378.
5. Афраймович Э. Л., Первалова Н. П. GPS-мониторинг верхней атмосферы Земли. – Иркутск: ГУ НИЦ ВСИЦ СО РАН, 2006. – 480 с.

6. Перевалова Н. П. Оценка характеристик наземной сети приемников GPS/ГЛОНАСС, предназначенной для мониторинга ионосферных возмущений естественного и техногенного происхождения // Солнечно-земная физика. 2011. № 19. С. 124-133.

7. Ясюкевич Ю. В., Перевалова Н. П., Едемский И. К., Полякова А. С. Отклик ионосферы на гелио- и геофизические возмущающие факторы по данным GPS. – Иркутск: ИГУ, 2013. - 259 с.

8. Yeh K. C., Liu C. H. Radio wave scintillations in the ionosphere // Proceedings of the Institute of Electrical and Electronic Engineers. 1982. Vol. 70. № 4. P. 324-360.

9. Priyadarshi S. A. Review of Ionospheric Scintillation Models // Surveys in Geophysics. 2015. № 2 (36). P. 295-324.

10. Fremouw E. S., Leadabrand R. L., Livingston R. C., Cousins M. D., Rino C. L., Fair B. C., Long R. A. Early results from the DNA Wideband satellite experiment – Complex-signal scintillation // Radio Science. 1978. № 1 (13). P. 167-187.

11. Маслов О. Н., Пашинцев В. П. Модели трансionoсферных радиоканалов и помехоустойчивость систем космической связи. Приложение к журналу Инфокоммуникационные технологии. Выпуск 4. – Самара: ПГАТИ, 2006. – 358 с.

12. Knepp D. L. Multiple phase-screen calculation of the temporal behavior of stochastic waves // Proceedings of the Institute of Electrical and Electronic Engineers. 1983. Vol. 71. № 6. P. 722-737.

13. Bogusch R. L., Gulgliano F. W., Knepp D. L. Frequency-selective scintillation effects and decision feedback equalization in high data-rate satellite links // Proceedings of the Institute of Electrical and Electronic Engineers. 1983. Vol. 71. № 6. P. 754-767.

14. Bogusch R. L., Gulgliano F. W., Knepp D. L., Michelet A. X. Frequency selective propagation effects on spread – spectrum receiver tracking // Proceedings of the Institute of Electrical and Electronic Engineers. 1981. Vol. 69. № 7. P. 787-796.

15. ГЛОНАСС. Принципы построения и функционирования / под. ред. А. И. Петрова, В. Н. Харисова – М.: Радиотехника, 2010. – 800 с.

16. Волков Н. М., Иванов Н. Е., Салищев В. А., Тюбалин В. В. Глобальная спутниковая радионавигационная система ГЛОНАСС // Зарубежная радиоэлектроника. Успехи современной радиоэлектроники. 1997. № 1. С. 31-46.

17. Шебшаевич В. С., Дмитриев П. П., Иванцевич Н. В., Калугин А. В., Ковалевский Э. Г., Кудрявцев И. В., Кутиков В. Ю., Молчанов Ю. Б., Максютенко Ю. А. Сетевые спутниковые радионавигационные системы / под. ред. В. С. Шебшаевича – М.: Радио и связь, 1993. – 408 с.

18. Pashintsev V. P., Peskov M. V., Smirnov V. M., Smirnova E. V., Tynyankin S. I. Procedure for Extraction of Small-Scale Variations in the Total Electron Content of the Ionosphere with the Use of Transionospheric Sounding Data // Journal of Communications Technology and Electronics. 2017. Vol. 62. № 12. P. 1336-1342.

19. GPStation-6. GNSS Ionospheric Scintillation and TEC Monitor (GISTM) Receiver User Manual (OM-20000132). Rev. 2, 2012. – 89 p.

20. Shanmugam S., Jones J., MacAulay A., Van Dierendonck A. J. Evolution to Modernized GNSS Ionospheric Scintillation and TEC Monitoring // Proceedings of the 2012 IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium (April 23-26, 2012). – Myrtle Beach, 2012. P. 265-273.

21. Pashintsev V. P., Peskov M. V., Kalmykov I. A., Zhuk A. P., Senokosov M. A. Method for the evaluation of ionospheric diffractive and dispersive properties impact on the interference immunity of satellite communication systems // International Journal of Civil Engineering and Technology. 2018. Vol. 9. № 13. P. 44-61.

22. Фабрицио Д. А. Высокочастотный загоризонтный радар: основополагающие принципы, обработка сигналов и практическое применение. – М.: Техносфера, 2018. – 936 с.

23. Рыжкина Т. Е., Федорова Л. В. Исследование статических и спектральных трансатмосферных радиосигналов УКВ – СВЧ диапазона // Журнал радиоэлектроники. № 2. 2001. – URL: <http://jre.cplire.ru/jre/feb01/3/text.html> (дата обращения 07.06.2020).

24. Ван Трис Г. Теория обнаружения, оценок и модуляции. Том 3. – М.: Сов. радио, 1977. – 664 с.

25. Финк Л. М. Теория передачи дискретных сообщений. – М.: Сов. радио, 1970. – 728с.

26. Сосулин Ю. Г. Теоретические основы радиолокации и радионавигации. – М.: Радио и связь, 1992. – 304с.

27. Пашинцев В. П., Солчатов М. Э., Спирин А. М., Катков К. А. Оценка погрешности измерения псевдодальности в спутниковых радионавигационных системах при возмущениях ионосферы в слое F // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2007. Т. 10. № 6. С. 8-14.

28. Пашинцев В. П. Влияние частотно-селективных замираний на измерение времени запаздывания сигналов систем космической связи // Радиотехника и электроника. 1998. Т. 43. № 4. С. 410-414.

29. Пашинцев В. П., Коваль С. А., Стрекозов В. И., Ляхов А. В. Обнаружение и пеленгация искусственных ионосферных образований с помощью спутниковых радионавигационных систем // Теория и техника радиосвязи. 2014. № 1. С. 88-93.

References

1. Verba V. S., Tatarskiy B. G. *Kompleksy s bespilotnymi letatel'nymi apparatami. Printsipy postroyeniya i osobennosti primeneniya kompleksov s BLA.* [Complexes with unmanned aerial vehicles. The principles of construction and features of the use of complexes with UAV]. Moscow, Radiotekhnika Publ., 2016. 507 p. (in Russian).

2. Vostrikov O. V. Obosnovaniye oblika navigatsionnoy sistemy udarnogo bespilotnogo letatel'nogo apparata [Substantiation of the appearance of the navigation system of an unmanned aerial vehicle]. *Trudy MAI*, 2011, no. 48, pp. 1-10 (in Russian).

3. Gorbachev O. A. *Navigatsionnoye obespecheniye vozdushnykh sudov grazhdanskoy aviatsii v usloviyakh vozmushchennoy ionosfery. Diss. dokt. tehn. nauk*

[Navigation support of civil aircraft in conditions of disturbed ionosphere. D.Sc. Thesis]. Moscow, Moscow State Technical University of Civil Aviation, 2009. 324 p. (in Russian).

4. Aarons J. Global Morphology of Ionospheric Scintillations. *Proceedings of the Institute of Electrical and Electronic Engineers*, 1982, vol. 70, no. 4, pp. 360-378.

5. Afrajmovich E. L., Perevalova N. P. *GPS-monitoring verhnej atmosvery Zemli* [GPS monitoring of the upper atmosphere of the Earth]. Irkutsk, Public institution Scientific center of the East Siberian scientific center of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences Publ., 2006. 480 p. (in Russian).

6. Perevalova N. P. Otsenka kharakteristik nazemnoy seti priyemnikov GPS/GLONASS, prednaznachennoy dlya monitoringa ionosfernykh vozmushcheniy yestestvennogo i tekhnogennogo proiskhozhdeniya [Estimated parameters of ground-based network of GPS/GLONASS receivers designed to perform monitoring of ionospheric disturbances of natural and technogenic origin]. *Solar-Terrestrial Physics*, 2011, no. 19, pp. 124-133 (in Russian).

7. Yasyukevith Yu. V., Perevalova N. P., Edemskiy I. K., Polyakova A. S. *Otklik ionosfery na gelio- i geofizicheskiye vozmushchayushchiye faktory po dannym GPS* [The response of the ionosphere to solar and geophysical disturbing factors according to GPS data]. Irkutsk, Irkutsk State University Publ., 2013. 259 p. (in Russian).

8. Yeh K. C., Liu C. H. Radio wave scintillations in the ionosphere. *Proceedings of the Institute of Electrical and Electronic Engineers*, 1982, vol. 70, no. 4, pp. 324-360.

9. Priyadarshi S. A. Review of Ionospheric Scintillation Models. *Surveys in Geophysics*, 2015, vol. 36, no. 2, pp. 295-324.

10. Fremouw E. S., Leadabrand R. L., Livingston R. C., Cousins M. D., Rino C. L., Fair B. C., Long R. A. Early results from the DNA Wideband satellite experiment – Complex-signal scintillation. *Radio Science*, 1978, vol. 13, no. 1, pp. 167-187.

11. Maslov O. N., Pashintsev V. P. *Modeli transionosfernykh radiokanalov i pomekhoustojchivost' sistem kosmicheskoy svyazi* [Models of transionospheric radio channels and noise stability of systems of space communication]. Samara, Volga region state academy of telecommunications and informatics Publ., 2006. 357 p. (in Russian).

12. Knepp D. L. Multiple phase-screen calculation of the temporal behavior of stochastic waves. *Proceedings of the Institute of Electrical and Electronic Engineers*, 1983, vol. 71, no. 6, pp. 722-737.

13. Bogusch R. L., Gulgliano F. W., Knepp D. L. Frequency-selective scintillation effects and decision feedback equalization in high data-rate satellite links. *Proceedings of the Institute of Electrical and Electronic Engineers*, 1983, vol. 71, no. 6, pp. 754-767.

14. Bogusch R. L., Gulgliano F. W., Knepp D. L., Michelet A. X. Frequency selective propagation effects on spread – spectrum receiver tracking. *Proceedings of the Institute of Electrical and Electronic Engineers*, 1981, vol. 69, no. 7, pp. 787-796.

15. Petrov A. I., Kharisov V. N. *GLONASS. Printsipy postroyeniya i funktsionirovaniya* [GLONASS. Principles of construction and operation]. Moscow, Radiotekhnika Publ., 2010. 800 p. (in Russian).

16. Volkov N. M., Ivanov N. E., Salitshev V. A., Tyubalin V. V. Global'naya sputnikovaya radionavigatsionnaya sistema GLONASS [GLONASS Global Satellite Radio Navigation System]. *Zarubezhnaya radioelektronika. Uspekhi sovremennoy radioelektroniki*, 1997, no. 1, pp. 31-46 (in Russian).

17. Shebshaevich V. S., Dmitriev P. P., Ivantsevich N. V., Kalugin A. V., Kovalevsky E. G., Kudryavtsev I. V., Kutikov V. Yu., Molchanov Yu. B., Maksyutenko Yu. A. *Setevyye sputnikovyie radionavigatsionnyie sistemy* [Network satellite radio navigation systems]. Moscow, Radio i svyaz Publ., 1993. 408 p. (in Russian).

18. Pashintsev V. P., Peskov M. V., Smirnov V. M., Smirnova E. V., Tynyankin S. I. Procedure for Extraction of Small-Scale Variations in the Total Electron Content of the Ionosphere with the Use of Transionospheric Sounding Data. *Journal of Communications Technology and Electronics*, 2017, vol. 62, no. 12, pp. 1336-1342.

19. GPStation-6. GNSS Ionospheric Scintillation and TEC Monitor (GISTM) Receiver User Manual (OM-20000132). Rev. 2, 2012. 89 p.

20. Shanmugam S., Jones J., MacAulay A., Van Dierendonck A. J. Evolution to Modernized GNSS Ionospheric Scintillation and TEC Monitoring. *Proceedings of the 2012 IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium (April 23-26, 2012)*. Myrtle Beach, 2012, pp. 265-273.

21. Pashintsev V. P., Peskov M. V., Kalmykov I. A., Zhuk A. P., Senokosov M. A. Method for the evaluation of ionospheric diffractive and dispersive properties impact on the interference immunity of satellite communication systems. *International Journal of Civil Engineering and Technology*, 2018, vol. 9, no. 13, pp. 44-61.

22. Fabrizio G. A. *High Frequency Over-the-Horizon Radar: Fundamental Principles, Signal Processing, and Practical Applications*. McGraw Hill Professional Publ., 2013. 922 p.

23. Ryzhkina T. E., Fedorova L. V. Issledovaniye staticheskikh i spektral'nykh transatmosfernykh radiosignalov UKV – SVCH diapazona [Investigation of the static and spectral transatmospheric radio signals of the VHF - microwave range] *Journal of radio electronics*, 2001, no. 2. Available at: <http://jre.cplire.ru/jre/feb01/3/text.html> (accessed 07 June 2020) (in Russian).

24. Van Trees G. *Detection, Estimation, and Modulation Theory. Part III*. John Wiley and Sons Publ., 1971. 638 p.

25. Fink L. M. *Teoriya peredachi diskretnykh soobshcheniy* [Discrete Message Theory]. Moscow. Sovetskoe Radio Publ., 1970. 728p. (in Russian).

26. Sosulin Yu. G. *Teoreticheskiye osnovy radiolokatsii i radionavigatsii* [Theoretical Foundations of Radio Location and Radio Navigation]. Moscow. Radio i svyaz Publ., 1992. 304 p. (in Russian).

27. Pashintsev V. P., Solchatov M. E., Spirin A. M., Katkov K. A. Otsenka pogreshnosti izmereniya psevdodal'nosti v sputnikovykh radionavigatsionnykh sistemakh pri vozmushcheniyakh ionosfery v sloye F [Estimation of the error in

measuring pseudorange in satellite radio navigation systems under ionospheric disturbances in the F layer]. *Fizika volnovykh protsessov i radiotekhnicheskie sistemy*, 2007, vol. 10, no. 6, pp. 8-14. (in Russian).

28. Pashintsev V. P. Influence of the Frequency-Selective Fading on Measuring the Time Delay of Signals from Space Communications Systems. *Journal of Communications Technology and Electronics*, 1998, vol. 43, no. 4, pp. 373-377.

29. Pashintsev V. P., Koval S. A., Strekozov V. I., Lyakhov A. V. Artificial Ionospheric Buildup Detection and Direction Finding by Means of Satellite Navigation Systems. *Radio Communication Theory and Equipment*, 2014, no. 1, pp. 88-93 (in Russian).

Статья поступила 08 июня 2020 г.

Информация об авторах

Пашинцев Владимир Петрович – доктор технических наук, профессор. Профессор кафедры «Информационная безопасность автоматизированных систем». Северо-Кавказский федеральный университет. Область научных интересов: влияние возмущений ионосферы на показатели качества систем спутниковой связи и навигации. E-mail: pasintsevp@mail.ru

Адрес: 355017, Россия, г. Ставрополь, ул. Пушкина, д. 1.

Линец Геннадий Иванович – доктор технических наук, доцент, Заведующий кафедры «Инфокоммуникации». Северо-Кавказский федеральный университет. Область научных интересов: синтез структурно-сетевых показателей телекоммуникационных сетей, сети связи на беспилотных летательных аппаратах. E-mail: kbyt@mail.ru

Адрес: 355017, Россия, г. Ставрополь, ул. Пушкина, д. 1.

Коваль Станислав Андреевич - кандидат технических наук. Докторант. Военная академия связи имени Маршала Советского Союза С. М. Буденного. Область научных интересов: мониторинг параметров ионосферы в интересах декаметровый связи. E-mail: _bober_@mail.ru

Адрес: 194064, Россия, г. Санкт-Петербург, Тихорецкий пр., д. 3.

Сенокосов Михаил Алексеевич – соискатель ученой степени кандидата технических наук. Аспирант кафедры «Информационная безопасность автоматизированных систем». Северо-Кавказский федеральный университет. Область научных интересов: повышение устойчивости декаметровый связи в условиях диффузной многолучевости. E-mail: m.senokosov@infocom-s.ru

Адрес: 355017, Россия, г. Ставрополь, ул. Пушкина, д. 1.

Мельников Сергей Владимирович – соискатель ученой степени кандидата технических наук. Аспирант кафедры «Инфокоммуникации». Северо-Кавказский федеральный университет. Область научных интересов: синтез телекоммуникационных сетей на беспилотных летательных аппаратах. E-mail: territoreer@yandex.ru

Адрес: 355017, Россия, г. Ставрополь, ул. Пушкина, д. 1.

The error in determining the pseudorange in the global navigation satellite system with disturbances in the ionosphere

V. P. Pashintsev, G. I. Linets, S. A. Koval,
M. A. Senokosov, C. V. Melnikov

Problem statement: it is known that natural and artificial indignations of an ionosphere are followed by simultaneous formation of not uniformity of large, average and small scales. Now at design of global navigation satellite systems (GNSS) the increase of an error of determination of pseudo-range by the navigation equipment of consumers in the conditions of regular indignations of an ionosphere and formation of large and mid-scale not uniformity is considered. For elimination of the ionospheric making error of determination of pseudo-range two-frequency and differential operating modes of GNSS at which by 2-3 times the noise component of an error increases are traditionally used. Therefore for its reduction instead of signals with a narrow strip of a range (1 MHz) use signals with a wide strip (10 MHz). However their application can lead to considerable (much and more) to increase in a noise error if in an ionosphere are formed intensive small-scale heterogeneity. This results from the fact that dispersion of radio waves on small-scale not uniformity leads to emergence of a mnogoluchevost and narrowing of a strip of coherence of the transionospheric channel to values less than 1 MHz. It causes emergence of frequency selective dying down of the accepted signals which cause increase of a noise error of measurement of pseudo-range in the correlation receiver. **The purpose of work** is development of techniques of assessment of an error of measurement of pseudo-range the navigation equipment of consumers of GNSS working in the single-frequency, two-frequency or differential modes in the conditions of the indignations of an ionosphere accompanied with simultaneous formation of not uniformity of various scales (large, average and small). **The novelty** consists in theoretical generalization of the models and methods applied to assessment of an ionospheric error of measurement of pseudo-range by the navigation equipment of consumers of GNSS in the conditions of formation of large and mid-scale not uniformity, and assessment of a noise error of measurement of pseudo-range in the conditions of formation of intensive small-scale not uniformity. **Result:** analytical dependences of an error of measurement of pseudo-range in the navigation equipment of consumers of SNRS are received from frequency parameters of the transmitted GNSS signals (bearing frequencies and strips of a range), the relation signal/noise on an entrance of the measuring receiver and a mean square deviation of small-scale fluctuations of full electronic maintenance of an ionosphere concerning their average value (considering large and mid-scale heterogeneity). **Practical importance:** results of forecasting of growth of errors of measurements of pseudo-range in the navigation equipment of consumers of GNSS working in various modes (single-frequency, two-frequency and differential), in the conditions of natural indignations of an ionosphere in the field of the polar and equatorial latitudes and artificial (technogenic) indignations of an ionosphere which are followed by formation of intensive small-scale not uniformity of an ionosphere are received. It is shown that in the latter case the error of determination of pseudo-range can reach values 35 ... 384 m and will take place when using in GNSS of signals with a wide strip of a range (10 MHz) and a two-frequency operating mode of the navigation equipment of consumers who are traditionally used for reduction noise and ionospheric making errors of measurement of pseudo-range.

Keywords: satellite radio navigational system, unmanned aerial vehicle, full electronic maintenance of an ionosphere, small-scale fluctuations, frequency selective dying down, error of measurement of pseudo-range.

Information about Authors

Vladimir Petrovich Pashintsev – Dr. habil. of Engineering Sciences, Full Professor. Professor of at the Department of Information Security of Automated Systems. North Caucasus Federal University. Field of research: the influence of ionospheric disturbances on the quality indicators of satellite communication and navigation systems. E-mail: pasintsevp@mail.ru

Address: Russia, 355017, Stavropol, Pushkina street, 1.

Gennadiy Ivanovich Linets – Dr. habil. of Engineering Sciences, Docent. Head of at the Department of Infocommunications. North Caucasus Federal University. Field of research: synthesis of structural and network indicators of telecommunication networks, communication networks on unmanned aerial vehicles. E-mail: kbytw@mail.ru

Address: Russia, 355017, Stavropol, Pushkina street, 1.

Stanislav Andreevich Koval – Ph.D. of Engineering Sciences. Doctoral Candidate. Military Communications Academy named after the Marshal of the Soviet Union S. M. Budenny. Field of research: monitoring of ionosphere parameters for decimeter radio. E-mail: _bober_@mail.ru

Address: Russia, 194064, St. Petersburg, Tikhoretsky avenue, 3.

Mikhail Alekseevich Senokosov – Doctoral student. Postgraduate student of the Department of Information Security of Automated Systems. North Caucasus Federal University. Field of research: increasing decameter coupling stability under diffuse multipath conditions. E-mail: m.senokosov@infocom-s.ru

Address: Russia, 355017, Stavropol, Pushkina street, 1.

Sergey Vladimirovich Melnikov – Doctoral student. Postgraduate student of the Department of Infocommunications. North Caucasus Federal University. Field of research: synthesis of telecommunication networks on unmanned aerial vehicles. E-mail: territoreer@yandex.ru

Address: Russia, 355017, Stavropol, Pushkina street, 1.