

## К ВОПРОСУ ОЦЕНКИ ПОМЕХОЗАЩИЩЕННОСТИ НАВИГАЦИОННОЙ АППАРАТУРЫ ПОТРЕБИТЕЛЯ ГЛОНАСС В МНОГОКАНАЛЬНОМ РЕЖИМЕ ПРИЕМА

**В.К. Снежко**, канд. техн. наук, доцент

**С.А. Якушенко**, канд. техн. наук, доцент, старший научный сотрудник НИЦ

**В.Е. Егрушев**, канд. техн. наук доцент

**С.С. Веркин**, канд. техн. наук, преподаватель

**В.В. Антонов**, преподаватель

**Е.В. Чеканова**, преподаватель

**Военная академия связи им. Маршала Советского Союза С.М. Буденного**  
(Россия, г. Санкт-Петербург)

DOI:10.24412/2500-1000-2023-3-2-45-51

**Аннотация.** Статья посвящена исследованию помехозащищенности многоканального приемника навигационной аппаратуры потребителя на основе учета преднамеренных помех во всех радионавигационных каналах. Приведена математическая модель оценки помехозащищенности многоканального приемника спутниковой навигации с учетом особенностей нормального функционирования каждого канала. Вскрыты проблемы низкой помехозащищенности аппаратуры спутниковой навигации потребителя. Результаты исследования могут использоваться для оценки помехозащищенности аппаратуры спутниковой навигации и разработки перспективных ее образцов.

**Ключевые слова:** многоканальный приемник, навигационная аппаратура потребителя, помехозащищенность, вероятность радиоподавления.

Глобальные навигационные спутниковые системы (ГНСС) совместно с мобильной спутниковой связью вносят неопределимый вклад в развитие систем управления транспортом, охраны и сопровождения ценных грузов, ориентирование пользователей на местности и т.п. Для приема радионавигационных сигналов на каждом подвижном объекте (транспортном средстве) размещается спутниковая навигационная аппаратура потребителя (НАП), навигационная информация с которой передается по радиоканалам мобильной связи на диспетчерские пункты системы контроля и управления транспортом.

В общем, интеграция технологий в системе управления подвижными объектами позволяет сократить время на передвижение и безопасность движения транспортом, что в конечном итоге повышает пропускную способность магистралей [1, 2]. Однако, включение навигационной информации в контур управления является важным и ответственным шагом, так как требует от НАП надежности и достоверности предоставляемой пользователям ин-

формации. Поскольку открытость радионавигационных линий, сложность электромагнитной обстановки мегаполисов и физико-географических условий эксплуатации НАП нередко приводят к техническому сбою ее работы. Более того, характерной чертой современной геополитической обстановки является международный и кибертерроризм, нечестная конкуренция, объектом атаки которых является в том числе и НАП. Эти негативные воздействия могут привести к снижению эффективности управления транспортными средствами [3, 4, 5, 6].

Таким образом, на современном этапе развития общества НАП функционирует в условиях применения преднамеренных и непреднамеренных помех. В силу наличие доступных радиоканалов и специфических особенностей функционирования ГНСС [1, 2] ее элементы уязвимы к воздействию радиопомех, которые дезорганизуют работу систем управления в целом. Поэтому прогнозирование помехозащищенности НАП в условиях воздействия дестабилизирующих факторов и пути ее

повышения является важным направлением научных исследований, которым и посвящена данная работа.

### Подходы к оценке помехозащищенности радионавигационной линии

Одним из подходов прогнозирования помехозащищенности является оценка вероятности радиоподавления НАП ( $P_{рп}$ ), как обратной величины вероятности нор-

мального ее функционирования в условиях преднамеренных помех,  $P_{нф} = 1 - P_{рп}$  [3, 7]. Показатель  $P_{нф}$  есть вероятность того, что отношение мощности сигнала  $P_c$  к суммарной мощности помехи  $P_{п}$  на входе приемника НАП будет больше заданной величины  $q^*$ , обеспечивающей требуемое качество определения местоположения объекта:

$$P_{нф} = p \left[ \left( P_{c[дБВт]} - P_{п[дБВт]} \right) \geq q^*_{[дБ]} \right], \quad \sigma_d < \sigma_d^*_{тр}, \quad (1)$$

где  $\sigma_d$  ( $\sigma_d^*_{тр}$ ) – текущая (требуемая) среднеквадратическая погрешность определения местоположения;

На радиолинии подавления помеха подвергается замиранию, огибающая ампли-

туды которой описывается логнормальным законом распределения. Тогда вероятность нормального функционирования НАП можно вычислять по формуле для интеграла вероятностей [3]

$$P_{нф/\Delta\varphi_i} = \Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-t^2/2} dt, \quad (2)$$

где  $x = (P_c - P_{п\Sigma} - q^*) / \sigma_{\Sigma}$ ;  $\sigma_{\Sigma}$  – среднеквадратическая погрешность отношения сигнала и суммарной помехи. Обычно критерием радиоподавления НАП является ухудшение точности определения местоположения в три раза, т. е.  $\sigma^* = 3\sigma$ .

Второй подход заключается в оценке

коэффициента помехозащиты, который определяется отношением максимальной средней мощности помех  $P_{п}$  в полосе частот полезного сигнала к средней мощности сигнала  $P_c$ , при котором точность определения координат не хуже требуемой [3, 8]

$$K_{п}^* = P_{п}/P_c \text{ или } K_{пз} \geq K_{пз}^* \text{ при } \sigma_d < \sigma_d^*_{тр}, \quad (3)$$

где  $K_{пз}$  ( $K_{пз}^*$ ) – расчетный (паспортный) коэффициент помехозащиты НАП;  $P_{п} = \mathcal{E}_{пп} + G_{нап}(\varphi) - W_{\Sigmaп}(R_{рп}) - W_{пол}$  – уровень помехи на входе приемника НАП;  $P_c = \mathcal{E}_{пс} - W_{\Sigmaс} + A_{нап}$  – уровень полезного сигнала на входе НАП;  $W_{\Sigmaп}$  – суммарное затухание на трассе радиоподавления;  $W_{\Sigmaс}$  – суммарное затухание на трассе радионавигации;  $W_{пол}$  – поляризационные потери, учитывающие несоответствие поля-

ризации антенны передатчика помех и НАП;  $G_{асн}$  – коэффициент усиления антенны НАП;  $G_{асн}(\varphi)$  – коэффициент усиления антенны НАП в направлении ( $\varphi$ ) передатчика помех;  $\mathcal{E}_{пп} = P_{пп} + G_{пп}$  – энергопотенциал передатчика помех;  $\mathcal{E}_{пс} = P_{пп} + G_{пп}$  – энергопотенциал передатчика полезного сигнала.

Параметр  $K_{п}$  может быть рассчитана по формуле [3]

$$K_{п} = \frac{P_{п}}{P_c} = \frac{N_{п}\Delta f_c}{P_c} = \left( \frac{1}{q_{c/n_0}} - \frac{1}{q_{c/n_{эв}}} \right) \Delta f_c \approx \frac{\Delta f_c}{q_{c/n_{эв}}}, \quad (4)$$

где  $\Delta f_c$  – полоса частот спутникового сигнала;  $q_{c/n_{\text{экв}}}$  – эквивалентное отношение мощности сигнала к спектральной мощности помехи, обеспечивающее требуемую вероятность обнаружения полезного сигнала при заданной вероятности ложной тревоги.

Согласно [2, 3, 9] к НАП предъявляются следующие оперативно технические требования в части помехозащищенности: 25 дБ для узкополосного диапазона частот (L1) и 35 для широкополосного диапазона (L2) от различного вида помех (заградительных, импульсных, гармонических и шумовых).

Приведенные методики позволяют оценить помехозащищенность одной радионавигационной линии (дуэльная ситуация), а не приемника в целом. Так как приемник НАП ГЛОНАСС одновременно принимает несколько радионавигационных сигналов на разных частотах, то радиоподавление одной линии НАП не несет достоверной информации о его работоспособности. Поэтому далее рассмотрим прогноз помехозащищенности многоканального приемника НАП, в зависимости от количества помех в каналах и режима работы НАП.

#### **Помехозащищенность НАП в многоканальном режиме**

Навигационный приемник ГЛОНАСС одновременно принимает сигналы от нескольких наблюдаемых навигационных космических аппаратов (НКА) на разных частотах. Для нормального функционирования НАП достаточно четырех сигналов.

$$P_m^n = \sum_{i=m}^n P_{i,n} = \sum_{i=m}^n C_n^m P_{\text{нф}}^m (1 - P_{\text{нф}})^{n-m} \quad (5)$$

Здесь  $P_m^n$  – вероятность нормального функционирования не менее  $m$  каналов из  $n$  наблюдаемых;  $P_{i,n}$  – вероятность нормальной работы ровно  $i$  каналов из  $n$ ;  $C_n^m = n! / (n!(n-m)!)$  – биномиальный коэффициент (число сочетаний из  $n$  по  $m$ );  $P_{\text{нф}}$  – вероятность нормального функционирования одного канала НАП в условиях

Поэтому оценка помехозащищенности задача неоднозначная, решение которой будет зависеть от конкретных условий эксплуатации и количества мешающих сигналов на входе приемника. Так, например, навигационный приемник «Перунит», имеет не 1, а 36 каналов. Реально на практике наблюдается не менее 8 спутников ГЛОНАСС, значит, чтобы подавить такой приемник нужно подавить не менее 5 каналов. Будем считать, что все каналы НАП функционируют в одинаковых условиях, тогда вероятность подавления всех каналов одинаковая.

Навигационная аппаратура может нормально функционировать если будет принимать не менее 4-х сигналов в режиме 3D, и 3-х в режиме 2D. Рассмотрим воздействие помехи в диапазоне всех принимаемых частот (каналов) НАП, когда прицельные помехи одновременно действуют на  $m$  частотах. При этом помехозащищенность одного радионавигационного канала оценивается по вышеприведенным формулам, позволяющих оценить вероятность нормального функционирования одного канала.

Суть методики оценки нормального функционирования многоканального приемника НАП в целом основана на оценке вероятности сложных событий. Общая формула для расчёта помехозащищенности многоканального приемника НАП при принятом допущении имеет вид модели Бернулли [10, 11]

радиопомех.

#### **Оценка помехозащищенности многоканального приемника**

На рисунке 1 приведены рассчитанные зависимости вероятности нормальной работы многоканальной НАП для режима 3D в зависимости от вероятности нормальной работы одного канала. Анализ графиков показывает, что при приёме сигналов от 4-х спутников и требуемой вероятности 0,95

вероятность нормальной работы одного канала должна быть не менее 0,987, а при

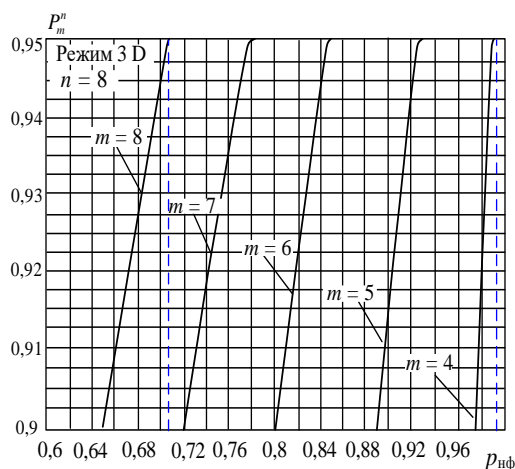


Рис. 1. Помехозащищенность НАП от вероятности нормального функционирования каналов в режиме 3D

На рисунке 2 приведены зависимости вероятности нормальной работы многоканальной НАП для режима 2D в зависимости от вероятности нормальной работы одного канала. При приёме сигналов от 4-х спутников и требуемой вероятности 0,95 вероятность нормальной работы одного канала должна быть не менее 0,902, при приёме сигналов от 8 спутников – 0,6, а при приёме сигналов от 3 спутников – 0,982.

Из рисунков 1 и 2 следует, что требуемая вероятность нормальной работы одного канала существенно снижается в режиме 2D. Поэтому данный режим целесообразно применять в условиях воздействия помех.

На рисунке 3 приведены зависимости вероятности нормального функционирования канала НАП от дальности подавления при разных значениях затухания за счёт рельефа местности и коэффициенте помехозащиты  $q = 32$  дБ (величина, обратная требуемому отношению сигнал/помеха для нормального функционирования работы). Из этих графиков следует, что на открытых интервалах дальность радиоподавления канала НАП при отсутствии затухания на рельефе составляет тысячи километров. Однако, протяжённость открытого интервала более 400 км не обеспечить даже при высоте полёта ЛПС 10 000 м. При стан-

приёме сигналов от 8 спутников – 0,712.

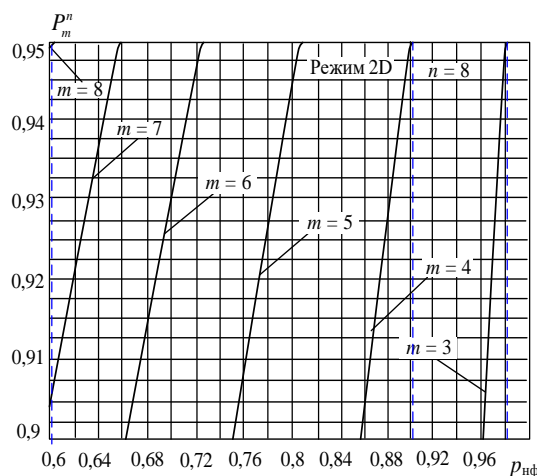


Рис. 2. Помехозащищенность НАП от вероятности нормального функционирования каналов в режиме 2D

дартном затухании сигнала за счёт рельефа местности на полуоткрытых интервалах 20-30 дБ дальность подавления составляет 250-500 км. Таким образом, суммарная защита канала НАП за счёт рельефа местности и коэффициента помехозащиты может быть не менее 50 дБ.

На рисунке 4 приведены зависимости вероятности нормального функционирования НАП в целом от дальности радиоподавления при затухании за счёт рельефа местности 30 дБ, коэффициенте помехозащиты  $q = 32$  дБ и режимах работы 3D и 2D с использованием в навигационных определениях различного числа навигационных космических аппаратов. В режиме 3D из восьми наблюдаемых НКА ( $n = 8$ ) используется НАП от четырех до восьми ( $m = 4...8$ ), а в режиме 2D – от трех до восьми ( $m = 3...8$ ).

В режиме 3D дальность радиоподавления НАП составляет не более 220 км при использовании 4 НКА и 105 км – 8 НКА.

В режиме 2D дальность радиоподавления НАП составляет не более 210 км при использовании 3 НКА, 145 км – 4 НКА и 85 км – 8 НКА.

Как видим при малом числе используемых НКА разница в дальности подавления для режима 2D и 3D существенная (75 км – 85 км), а при большом числе видимых НКА незначительная (20 км). Это значит,

что при открытой небесной сфере и слабой интенсивности радиоподавления нет особого смысла переходить в режим 2D для повышения помехозащищённости НАП. И,

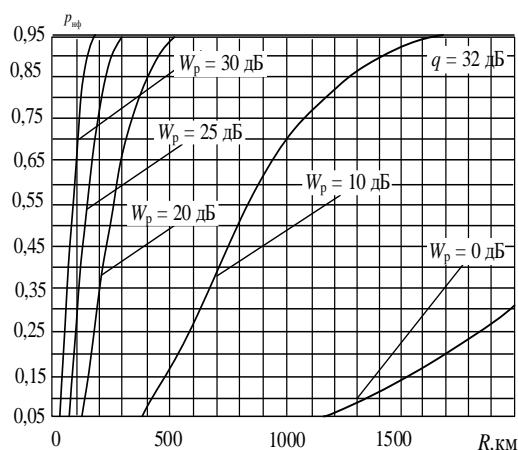


Рис. 3. Зависимость помехозащищённости канала НАП от дальности радиоподавления и влияния рельефа местности

Из вышеприведённых исследований следует отметить следующие:

1. Помехозащищённость многоканального приемника НАП в целом определяется помехозащищённостью его индивидуальных каналов и количеством неподдавленных и используемых в НАП каналов. Помехозащищённость тем выше, чем больше используется для навигационных измерений индивидуальных радионавигационных каналов и их помехозащищённость.

2. Качество функционирования многоканального приемника НАП зависит от количества подавленных частотных каналов. Чем больше каналов подавлено, тем более жёстче требования предъявляются к помехозащищённости индивидуальных каналов.

3. Режим 2D хотя и имеет ограниченные возможности по определению навигационных параметров, но обладает лучшей помехозащищённостью в условиях радиоподавления, причем его эффективность тем больше, чем больше каналов будет подавлено.

4. Уровень помехозащищённости НАП определяется коэффициентом помехозащиты, который в современных приемниках ограничен 35 дБ, что недостаточно при

наоборот, при большой интенсивности подавления необходимо переходить в режим 2D и использовать защитные свойства местности.

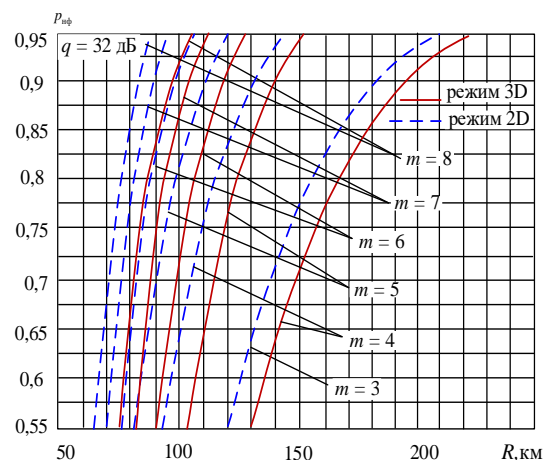


Рис. 4. Зависимость помехозащищённости НАП от дальности подавления режимов приема радиосигналов

большом энергопотенциале линии радиоподавления. Поэтому для защиты навигационного приемника от преднамеренных и непреднамеренных помех, необходимо использовать защитные свойства местности, что связано с особенностями функционирования ГНСС и радиоподавлением НАП с летно-подъемных средств.

#### Заключение

В работе предложен подход к оценке помехозащищённости многоканального приемника навигационной аппаратуры спутниковой радионавигационной системы ГЛОНАСС в условиях применения преднамеренных помех, сосредоточенных по спектру, основанный на учете влияния помех во всех каналах приема НАП.

Анализ результатов расчётов показывает, что НАП имеет недостаточную помехозащищённость. Поэтому для обеспечения требуемой вероятности нормальной работы необходимы меры защиты от помех. На этапе эксплуатации наиболее эффективным является использование защитных свойств местности, которые могут обеспечить дополнительное увеличение отношения сигнал/помеха на входе приемника НАП еще на 30 дБ за счет особенностей радиоподавления с летно-подъемных средств, приводящих к закрытию радиого-

ризонта, а следовательно, уменьшения уровня помехи.

Результаты исследования будут полезны разработчикам аппаратуры спутниковой навигации и систем управления транс-

портными средствами [12], а также при проектировании новой и эксплуатации существующей НАП в условиях применения преднамеренных помех [2].

#### Библиографический список

1. ГЛОНАСС. Принципы построения и функционирования / Под ред. А.И. Перова, В.Н. Харисова; изд. 4-е, перераб. и доп. Радиотехника. – М., 2010. 800 с.
2. Средства и комплексы навигационного обеспечения систем управления специального назначения: учебник для вузов связи / В. К. Снежко, С. А. Якушенко. – СПб: ВАС, 2018. – 508 с.
3. Наземное навигационное обеспечение в задачах: учеб. пособие / Снежко В. К., Якушенко С. А., Мальцев А. Д. – СПб.: ВАС, 2010. – 240 с.
4. Якушенко, С. А., Проблемы навигационного обеспечения систем мониторинга и диспетчеризации подвижных объектов и оценка его безопасности / С. А. Якушенко // Информатика и космос. – 2019. – № 2. – С. 78-81.
5. Михайлов. Р.Л. Радиоэлектронная борьба в Вооружённых силах США. – СПб.: Научноёмкие технологии, 2018. – 131 с.
6. Радиоэлектронная борьба со спутниковыми радионавигационными системами / А. П. Дятлов А.П., П. А. Дятлов, Б. Х. Кульбикаян. – М.: Радио и связь, 2004. – 226 с.
7. Дворников, С.В. Навигационное обеспечение подвижных объектов и проблемы его безопасности / С. В. Дворников, С. А. Якушенко, Е. Г. Боленко // Вопросы радиоэлектроники, сер. Техника и телевидение. – 2019. – № 1. – С. 51-60.
8. Якушенко, С.А. Непараметрический метод оценки помехозащищённости спутниковых радионавигационных приемников в условиях воздействия ретрансляционных помех / С. А. Якушенко, А. К. Малышев // Вопросы радиоэлектротехники. – 2016. – №6. – С. 88-93.
9. Прикладные задачи теории вероятностей / Е. С. Вентцель, Л. А. Овчаров. – М.: Радио и связь, 1983. – 416 с.
10. Якушенко, С.А. Развитие направлений применения аппаратуры спутниковой навигации потребителя в войсках связи / С. А. Якушенко, М. О. Снежко, М. О. Дворовой // Военная мысль. – 2019. – № 3. – С. 20-32.

---

**TO THE QUESTION OF EVALUATION OF IMMUNITY OF THE NAVIGATION  
EQUIPMENT OF THE GLONASS CONSUMER IN THE MULTI-CHANNEL  
RECEIVING MODE**

**V.C. Snezhko**, *Candidate of Technical Sciences, Associate Professor*

**S.A. Yakushenko**, *Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Senior Researcher of the National Research Center*

**V.E. Egrushev**, *Candidate of Technical Sciences, Associate Professor*

**S.S. Verkin**, *Candidate of Technical Sciences, Lecturer*

**V.V. Antonov**, *Lecturer*

**E.V. Chekanova**, *Lecturer*

**Military Academy of Communications named after Marshal of the Soviet Union**

**S.M. Budyonny**

**(Russia, St. Petersburg)**

***Abstract.** The article is devoted to the study of the noise immunity of a multi-channel receiver of consumer navigation equipment on the basis of taking into account intentional interference in all radio navigation channels. A mathematical model for assessing the noise immunity of a multi-channel satellite navigation receiver is given, taking into account the features of the normal functioning of each channel. The problems of low noise immunity of consumer satellite navigation equipment are revealed. The results of the study can be used to assess the noise immunity of satellite navigation equipment and develop its promising models.*

***Keywords:** multichannel receiver, consumer navigation equipment, noise immunity, radio suppression probability.*