

УДК 621.396.983

## ОБЗОР МЕТОДОВ ПОВЫШЕНИЯ ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТИ АППАРАТУРЫ ПОЛЬЗОВАТЕЛЕЙ СИСТЕМЫ NAVSTAR

С.А. ГОРШКОВ, В.А. КОНДРАТЕНКО

*Военная академия Республики Беларусь*

*Гуртьева, 1, Минск, 220057, Беларусь*

*Поступила в редакцию 12 ноября 2004*

В статье отражено современное состояние комплекса мер, принимаемых разработчиками аппаратуры пользователей системы NAVSTAR для повышения ее помехоустойчивости. Приведена систематизация методов повышения помехоустойчивости аппаратуры пользователей. Кратко рассмотрены основные особенности методов и их отличия. Основой статьи являются результаты проводимых научных исследований, справочные материалы и труды ведущих белорусских и зарубежных ученых по вопросам помехоустойчивости навигационной аппаратуры. При изложении материала использован принцип системного подхода.

*Ключевые слова:* помехоустойчивость, аппаратура пользователей системы NAVSTAR.

### Введение

Опыт последних военных конфликтов показал возрастающую роль в современных боевых действиях высокоточного оружия. Одним из средств обеспечения высокой эффективности применения такого оружия является использование для его наведения спутниковой радионавигационной системы NAVSTAR. В связи с тем что прогресс в области спутниковых радионавигационных систем привел к разработке противоборствующими сторонами средств радиоэлектронной борьбы, обеспечивающих снижение эффективности таких средств высокоточной навигации, разработчиками аппаратуры пользователей (АП) систем спутниковой навигации предпринимаются меры по повышению ее помехоустойчивости.

В настоящее время существует большое количество публикаций о методах повышения помехоустойчивости АП системы NAVSTAR, но отсутствует их четкая классификация. Целью же анализа, результаты которого приводятся в представленной статье, являлась систематизация методов повышения помехоустойчивости АП.

### Методы повышения помехоустойчивости аппаратуры пользователей системы NAVSTAR

Комплекс мер, принятых для обеспечения высокой помехоустойчивости АП, можно условно разделить на две части:

- 1) меры повышения отношения сигнал/помеха на входе следящих систем;
- 2) меры обеспечения устойчивости следящих систем к изменяющейся обстановке.

К первой группе мер можно отнести следующие.

1. Пространственная селекция сигналов путем формирования нулей диаграммы направленности антенны в направлении источника помех [1–6].

2. Частотная селекция зеркального канала приема и внеполосных излучений путем включения после антенны на входе СВЧ-усилителя преселекторов, работающих на частотах  $f_{ia} = 1575,42 \text{ ГГц}$  и  $f_{ii} = 1227,6 \text{ ГГц}$  [3].

3. Подавление негауссовских импульсных помех путем включения в схему усилителя промежуточной частоты ограничителей импульсных и синусоидальных помех до уровня внутреннего шума (использование для обработки схемы ШОС — широкополосное усиление—ограничение—согласованная фильтрация) [3].

4. Подавление гармонических помех, промодулированных частотой, равной частоте ведения обзора, путем использования в системе слежения за задержкой для режима допоиска навигационного сигнала последовательного обзора по времени запаздывания в постепенно нарастающем секторе.

Вышеперечисленные меры, применяемые в комплексе, могут повысить отношение сигнал/шум в АП:

для режима поиска С/А-сигнала (сигнала гражданского назначения) — на 20–25 дБ;

для режима слежения за параметрами Р-сигнала (сигнала военного назначения, обеспечивающего более высокую точность навигационных измерений по сравнению с С/А-сигналом) — на 35–40 дБ, а также улучшить ее точностные характеристики.

Ко второй группе мер обеспечения высокой помехоустойчивости АП системы NAVSTAR можно отнести [7, 8];

1) комплексирование АП с инерциальной навигационной системой с целью сужения эффективной полосы пропускания следящей системы  $\Delta f_{\alpha}$  за счет дополнительной компенсации влияния траекторных параметров носителя АП на параметры принимаемого навигационного сигнала;

2) адаптивную подстройку или переключение эффективной полосы пропускания следящей системы для оптимизации параметров фильтра при изменении отношения сигнал/шум и динамики движения носителей.

Адаптация  $\Delta f_{i\alpha}$  реализуется включением фильтра промежуточной частоты с регулируемой полосой после каждого из корреляторов систем слежения за несущей и задержкой или же изменением коэффициента усиления следящей системы.

В связи с этим вопрос помехоустойчивости АП специализированного назначения системы NAVSTAR следует рассматривать только с учетом вышеперечисленных мер по ее повышению.

### **Расчет показателей качества функционирования аппаратуры пользователей системы NAVSTAR в различных условиях ее применения**

Под помехоустойчивостью понимают свойство радиоэлектронного средства нормально функционировать в условиях помех [9]. Наибольшую помехоустойчивость приемник АП имеет в режиме слежения. Помехоустойчивость следящего режима работы АП характеризуется зависимостью вероятности срыва слежения  $P_{\text{ср}}$  от отношения сигнал/шум  $\rho$  на входе системы слежения. Строгое математическое решение данной задачи основано на решении задачи о достижении "поглощающего экрана" многомерным марковским процессом [10].

При малых ошибках слежения  $\varepsilon_{\alpha}(t_k) = \varepsilon_{\alpha}$  за параметрами сигнала  $\alpha$  мгновенную ошибку  $\varepsilon_{\alpha}$  можно считать гауссовской случайной величиной с нулевым математическим ожиданием и дисперсией флюктуационной ошибки в установившемся режиме  $D_{\alpha(\text{уст})}$ . Для расчета  $D_{\alpha(\text{уст})}$  обычно [11, 12] используют линеаризацию следящей системы. При этом вероятность того, что абсолютное значение мгновенной ошибки слежения будет больше заданного значения  $\varepsilon_{\text{max}}$  [12],

$$P_{\text{нó}}(\varepsilon_{\text{max}}) = 2 \int_{\varepsilon_{\text{max}}}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi D_{\alpha(\text{нó})}}} \exp\left(-\frac{\varepsilon_k^2}{2D_{\alpha(\text{нó})}}\right) d\varepsilon_k. \quad (1)$$

Результаты исследований, приведенные в [12], свидетельствуют о том, что помехоустойчивость системы слежения за несущей в АП лучше, чем у системы слежения за задержкой — на 1–2 дБ; системы слежения за фазой — на 5–8 дБ; варианта совместного использования систем слежения за задержкой и за фазой — на 3–4 дБ; варианта совместного использования систем слежения за задержкой и за несущей — на 4–5 дБ.

В связи с этим рассмотрим вероятность срыва функционирования  $P_{ср}$  системы слежения за несущей в виде фильтра первого порядка при маневрировании носителя АП в ходе полета с огибанием рельефа местности и при его прямолинейном движении, так как уровень помехи, приводящий к срыву системы слежения за несущей, гарантированно приведет и к срыву остальных следящих систем АП.

При использовании критерия установившейся ошибки [11] в случае ненулевой динамической ошибки  $(\bar{\Delta}_{дин. \alpha})_1$  величина  $\varepsilon_{max}$  составляет

$$\varepsilon_{max} = 0,1(0,5 \Delta\alpha - |\bar{\Delta}_{дин. \alpha}|). \quad (2)$$

Величина дисперсии флюктуационной ошибки записывается как

$$D_{\alpha(\dot{\alpha}\ddot{\alpha})} = \frac{\Delta F_{II}(1+\rho)}{4\pi\rho^2} \Delta f_{0\alpha}, \quad (3)$$

где  $\Delta F_{II}$  — ширина зубца амплитудно-частотной характеристики когерентного накопителя.

Динамическая ошибка фильтра Калмана первого порядка в установившемся режиме составляет

$$(\bar{\Delta}_{дин. \alpha})_1 = \frac{\ddot{\alpha}}{\Delta f_{0\alpha}^2}, \quad (4)$$

где  $\ddot{\alpha}$  — вторая производная параметра  $\alpha$ .

Анализ выражения (1) с учетом (2)–(4) показал, что вероятность срыва функционирования следящей системы первого порядка является функцией от отношения сигнал/шум, эффективной полосы замкнутой системы и второй производной изменения оцениваемого параметра при заданном значении времени когерентного накопления сигнала  $\hat{O}_i$ .

Если рассматривать в качестве носителя АП высокоскоростной маневрирующий объект с соответствующими ему техническими характеристиками, то целесообразно предполагать, что его бортовую АП можно отнести к первому классу (АП1) [13], т.е. предположить, что в ней принимаются меры по повышению помехоустойчивости. Результаты расчета вероятности срыва штатного режима функционирования АП1 сведены в таблице, где обозначено:  $\varepsilon_0$  — угол места навигационного космического аппарата;  $n_{\ddot{\alpha}}$  — допустимая перегрузка при совершении маневра.

**Вероятность срыва штатного режима функционирования аппаратуры пользователей первого класса в отсутствие помех**

Тип движения	Угол места, град (отношение сигнал/шум)	
	$\varepsilon_0=5^\circ$ ( $\rho \approx 500$ )	$\varepsilon_0=90^\circ$ ( $\rho \approx 750$ )
Прямолинейное	0	0
Маневр с $n_{\ddot{\alpha}} = 1,5$	0	0
Маневр с $n_{\ddot{\alpha}} = 2$	$2,4 \times 10^{-7}$	0
Маневр с $n_{\ddot{\alpha}} = 3$	$1,8 \times 10^{-5}$	0

Из представленных данных видно, что в отсутствие помех вероятность срыва штатного режима функционирования АП1 во всех случаях равна или стремится к нулю.

Для случая же, когда вследствие воздействия на АП помех отношение сигнал/шум снижается, графики зависимости вероятности срыва штатного режима функционирования АП1 и

АПЗ (АП третьего класса, в которой меры по повышению ее помехоустойчивости не предпринимаются [13]) от отношения сигнал/шум показаны на рис. 1 и 2 соответственно.

Из представленных данных видно, что при воздействии помех вероятность срыва штатного режима функционирования АП1 возрастает, хотя даже в случае  $\rho < 1$  отлична от единицы.

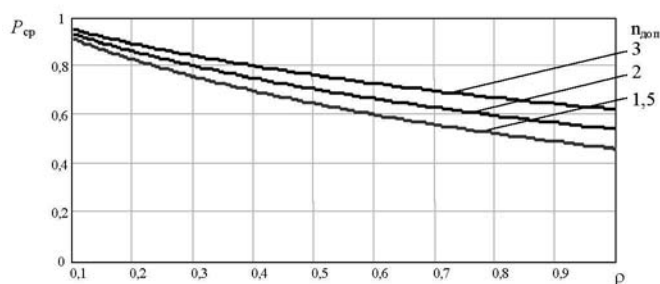


Рис. 1. Зависимость вероятности срыва функционирования АП1 от отношения сигнал/шум  $\rho$

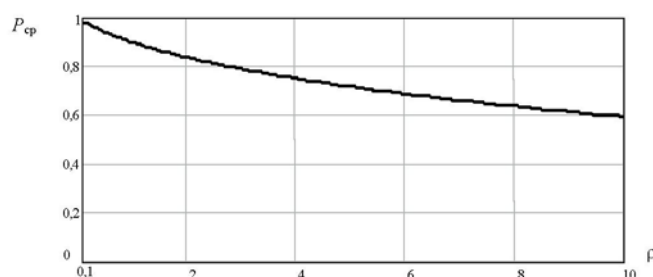


Рис. 2. Зависимость вероятности срыва функционирования АПЗ от отношения сигнал/шум  $\rho$

### Заключение

Результаты проведенного анализа комплекса мер по повышению помехоустойчивости АП системы NAVSTAR, а также расчета показателей качества функционирования АП в различных условиях ее применения показали следующее:

1) в связи с тем что в АП, устанавливаемой на высокоскоростных маневрирующих объектах, предпринимаются специальные меры по повышению ее помехоустойчивости, АП1 является сложным объектом радиоэлектронного подавления;

2) вопрос анализа характеристик срыва функционирования АП1 требует более пристального внимания, чем в [14], где по результатам эксперимента по радиоэлектронному подавлению АПЗ были сделаны выводы о низкой помехоустойчивости АП в целом.

## THE METHODS OF NAVSTAR SYSTEM USERS EQUIPMENT JAM-RESISTANT INCREASING REVIEW

S.A. GORSHKOV, V.A. KONDRATYONOK

### Abstract

In the article the modern condition of a complex of measures accepted by the developers of NAVSTAR system users equipment for increase of its jam-resistant is reflected. The systematization of methods of users equipment jam-resistant increasing is reduced. The basic features of methods and their difference are briefly considered. The basis the article are the results of spent scientific researches, reference materials and works of the belorussian and foreign scientists on a navigational equipment jam-resistant. At presentation of a material the principle of system approach is used.

## Литература

1. *Brown A., et al.* Miniaturized GPS Antenna Array Technology: ION 55 - Annual Meeting Proc. 1999.
2. *Reynolds D., Brown A.* Miniaturized GPS Antenna Array and Predicted Anti-Jam Performance: ION 55. — Annual Meeting Proc. 1999.
3. *Волынкин А.И., Кудрявцев И.В., Мищенко И.Н., Шебшаевич В.С.* // Зарубежная радиоэлектроника. 1983. № 4. С. 70–91.
4. *Brown A.* High Accuracy GPS and Antijam protection using a P(Y) Code Digital Beamsteering Receiver: ION 57 - Annual Meeting Proc. 2001.
5. *George F.* // Bus. & Commer. Aviat. 1998. № 6. P. 12.
6. *Rao S.* A Low Cost, Unclassified, Direct-Y Code Fast Acquisition SAASM: ION GPS-98 Proc. Nashville, 1998.
7. Глобальная спутниковая радионавигационная система ГЛОНАСС / Под ред. В.Н. Харисова. А.И. Перова, В.А. Болдина. 2-е изд., испр. М., 1999.
8. *Кудрявцев И.В., Мищенко И.Н., Волынкин А.И. и др.* Бортовые устройства спутниковой радионавигации / Под ред. В.С. Шебшаевича. М., 1988.
9. *Кравцов В.А., Лобанов А.Д.* Теория РЭБ. Мн., 1998.
10. *Тихонов В.И., Миронов М.А.* Марковские процессы. М., 1977.
11. *Бакут П.А., Большаков И.А., Герасимов Б.М. и др.* Вопросы статистической теории радиолокации / Под общ. ред. Г.П. Тартаковского. В 2 т. М., 1964. Т. 2.
12. *Перов А.И., Болденков Е.Н., Григоренко Д.А.* // Радиотехника. 2003. №7. С. 78 – 87.
13. *Кондратенок В.А.* // Доклады БГУИР. 2003. Т.1. №1. С. 34–38.
14. *Иванов М.П., Кашинов В.В.* Экспериментальная проверка помехозащищенности американской спутниковой навигационной системы GPS [Электронный ресурс]. 14 июня 2001 г. Режим доступа: <http://www.laboratory.ru>.