

вующие математические модели, связывающие проектные параметры спутника с экономическими показателями  $C_{\text{ОКР.б}}$ ,  $C_{\text{уд}}$ ,  $C_{\text{ур}}$ .

Таким образом, можно сделать следующие выводы:

1. Разработаны модели расчета экономической эффективности спутников связи для двух схем финансирования: из госбюджета или за счет внешнего банковского кредитования.

2. Для каждой схемы финансирования сформированы показатели экономической эффективности и методы их расчета: срок окупаемости базовых затрат и индекс доходности проекта.

3. Предложен критерий ограничения диапазона существования показателей экономической эффективности – доходность от проекта не ниже доходности от банковского вклада.

4. Разработанная модель может быть использована для нормирования показателей экономической эффективности спутников связи.

### Библиографические ссылки

1. Чеботарев В. Е., Косенко В. Е. Основы проектирования космических аппаратов информационного обеспечения : учеб. пособие / Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2011. 488 с.
2. Титов В. И. Экономика предприятия : учебник. М. : Эксмо, 2008. 416 с.
3. Лукашин Ю. П. Финансовая математика : учеб.-метод. комплекс. М. : Изд. центр ЕАОИ, 2008. 200 с.

### References

1. Chebotarev V. E. Kosenko V. E. *Osnovy proyektirovaniya kosmicheskikh apparatov informatsionnogo obespecheniya* (Foundation of information satellites design). Krasnoyarsk, 2011, 488 p.
2. Titov V. I. *Ekonomika predpriyatiya* (Enterprise economy, tutorial). Moscow, Eksmo, 2008, 416 p.
3. Lukashin Y. P. *Finansovaya matematika* (Financial mathematics. Educational methodical complex). Moscow, EAOI Publishing Center, 2008, 200 p.

© Косенко В. Е., Попов В. В., Матроницкий Д. А., Чеботарев В. Е., Внуков А. А., 2013

УДК 621.396.6

## ИССЛЕДОВАНИЯ ТОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК АНТЕННЫХ МОДУЛЕЙ ВЫСОКОТОЧНОГО ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ АМ415 В УГЛОМЕРНЫХ ИЗМЕРЕНИЯХ ПО СИГНАЛАМ ГЛОНАСС/GPS

А. Л. Асеев<sup>1</sup>, В. М. Владимиров<sup>2</sup>, Ю. Л. Фатеев<sup>3</sup>,  
А. И. Филиппов<sup>4</sup>, В. Ф. Шабанов<sup>2</sup>, В. Н. Шепов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Института физики полупроводников имени А. В. Ржанова СО РАН  
Россия, 630090, Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 13. E-mail: aseev@sbras.nsc.ru

<sup>2</sup>Красноярский научный центр СО РАН  
Россия, 660036, Красноярск, Академгородок, 50. E-mail: vlad@ksc.krasn.ru

<sup>3</sup>Сибирский федеральный университет  
Россия, 660074, Красноярск, ул. Киренского, 28. E-mail: fateev-yury@mail.ru

<sup>4</sup>Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева  
Россия, 660014, Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31  
E-mail: sovfa@iss-reshetnev.ru

*Разработаны трехдиапазонные (L1/L2/L3) антенные модули АМ415, состоящие из целевой полосковой антенны вытекающей волны с правой круговой поляризацией и малошумящего усилителя. Исследованы их точностные характеристики. Показано, что при измерении в частотном диапазоне L1 по созвездию ГЛОНАСС/GPS среднеквадратическое отклонение (СКО) ошибки позиционирования второго и третьего модуля АМ415 относительно первого составляет в горизонтальной плоскости менее 2,2 мм, в вертикальной менее 1,7 мм. СКО ошибки позиционирования по углам курса, крена и тангажа не хуже 9 угловых минут при расстоянии между центрами трех модулей 0,7 м и не хуже 4 угловых минут при расстоянии 2 м. Антенные модули АМ415 предназначены для высокоточного позиционирования по сигналам ГЛОНАСС/GPS.*

*Ключевые слова: целевая полосковая антенна, антенна с круговой поляризацией, высокоточное позиционирование по сигналам ГНСС, измерения по сигналам ГЛОНАСС/GPS.*

**STUDY OF ACCURACY CHARACTERISTICS OF THE ANTENNA MODULES  
OF HIGH-ACCURACY POSOTIONING AM415 IN ANGULAR OBSERVATIONS  
BY GLONASS/GPS SIGNALS**

A. L. Aseev<sup>1</sup>, V. M. Vladimirov<sup>2</sup>, Yu. L. Fateev<sup>3</sup>,  
A. I. Filippov<sup>4</sup>, V. F. Shabanov<sup>2</sup>, V. N. Shepov<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Rzhanov Institute of Semiconductor Physics of the SB RAS  
13 Lavrentieva prosp., Novosibirsk, 630090, Russia. E-mail: aseev@sbras.nsc.ru

<sup>2</sup>Krasnoyarsk Scientific Center of the SB RAS  
50 Akademgorodok, Krasnoyarsk, 660036, Russia. E-mail: vlad@ksc.krasn.ru

<sup>3</sup>Siberian Federal University  
28 Kirenskiy str., Krasnoyarsk, 660074, Russia. E-mail: fateev-yury@mail.ru

<sup>4</sup>Siberian State Aerospace University named after Academician M. F. Reshetnev  
31 "Krasnoyarskiy Rabochiy" prosp., Krasnoyarsk, 660014, Russia. E-mail: sovfa@iss-reshetnev.ru

*Tri-band (L1/L2/L3) antenna modules AM415 consisting of a patch slot leaky wave antenna with the right-hand circular polarization and a low-noise amplifier have been developed. Their accuracy characteristics is studied. It is shown that when taking measurements in the L1 frequency band using GLONASS/GPS combined constellation the root-mean square deviation (RMSD) of the positioning accuracy of the second and third module AM415 relative to the first one is 2.2 mm in the horizontal plane and 1.7 mm in the vertical plane. RMSD of the positioning accuracy with yaw, roll and pitch angles does not exceed 9 angular minutes at a distance of 0.7 m between the centers of three antenna modules and it is up to 4 angular minutes at a distance of 2 m. The antenna modules AM415 are designed for the high accuracy positioning by GLONASS/GPS signals.*

*Keywords: patch slot antenna, circular polarization antenna, high accuracy positioning using GNSS signals, measurements by GLONASS/GPS signals.*

Переносные приемные активные антенны высокоточного позиционирования по сигналам Глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) с успехом применяются для измерений углов курса, крена и тангажа стационарных и движущихся объектов. Одна из таких антенн, применяемых для угломерных измерений – щелевая полосковая антенна вытекающей волны [1; 2]. Несомненными достоинствами данной антенны являются низкопрофильность, широкополосность и единый стабильный фазовый центр, совпадающий с геометрическим центром антенны.

Излучатель щелевой полосковой антенны вытекающей волны выполняется из диэлектрической подложки с двусторонней металлизацией. Для приема СВЧ сигнала с правой круговой поляризацией резонансные щели в металле верхней стороны подложки закручиваются по спирали вокруг фазового центра антенны. В металле нижней стороны выполняется микрополосковая линия (МПЛ), индуктивно связанная со щелями, и нагруженная на активное сопротивление, равное волновому, для установления в МПЛ режима бегущей волны.

В работе [3] предложен новый способ улучшения технических характеристик щелевых полосковых антенн вытекающей волны, применяемых для высокоточного позиционирования по сигналам ГНСС. Показано, что применение дополнительных щелей с меньшей электрической длиной, чем электрическая длина основных щелей излучателя и выполненных в виде концентрических дуг вокруг фазового центра антенны, позволяет улучшить частотные, фазовые [3] и угловые [4] характеристики антенн. В частности, уменьшается коэффициент эллиптичности, увеличи-

вается подавление кроссполяризации и повышается стабильность локальных фазовых центров антенны, что повышает стойкость данных антенн к многолучевой интерференции, являющейся одним из основных источников ошибок высокоточного позиционирования.

В настоящей работе исследуются точностные характеристики переносных антенных модулей AM415, предназначенных для высокоточного позиционирования по сигналам ГНСС ГЛОНАСС/GPS в трех частотных диапазонах: L1, L2 и L3. Определяется точность позиционирования модулей AM415 в горизонтальной и вертикальной плоскостях и при измерениях углов курса, крена и тангажа.

На рис. 1, а показан внешний вид антенного модуля AM415. В его состав входит разработанная щелевая полосковая антенна вытекающей волны с правой круговой поляризацией [3] и малолшумящий усилитель (МШУ). Верхняя сторона излучателя щелевой полосковой антенны показана на рис. 1, б, нижняя – на рис. 1, в. Диаметр излучателя равен 145 мм, толщина 1,5 мм, расстояние от излучателя до экрана 13 мм. Рассчитанный (1) и измеренный (2) коэффициент стоячей волны по напряжению (КСВН) пассивной антенны не превышает 1.5 в диапазоне частот 1,15–1,65 ГГц (рис. 1, з).

В антенном модуле AM415 применен трехдиапазонный (L1/L2/L3) МШУ. Измеренные параметры МШУ во всех частотных диапазонах составили: коэффициент усиления  $30 \pm 1$  дБ, КСВН менее 1,5, коэффициент шума менее 2 дБ, ΔГВЗ менее 4 нс. Ток потребления МШУ не более 50 мА. Габаритные размеры корпуса AM415: диаметр 175 мм, высота 50 мм. Вес модуля AM415 составляет менее 1 кг.

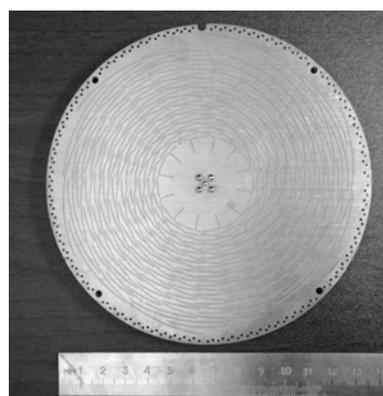
Для испытания антенных модулей АМ415 использовалась угломерная навигационная аппаратура МРК-32. Измерения углов курса, крена и тангажа проводились в частотном диапазоне  $L1$  в статическом режиме в нормальных климатических условиях на коротких (0.7 м), средних (1 м) и длинных (2 м) базах. В процессе испытаний записывались файлы измерительной информации, формируемой аппаратурой МРК-32, в том числе измеренные значения курса, крена и тангажа, а также координаты второго и третьего антенных модулей АМ415 относительно первого. В качестве основного критерия при оценке качества АМ415 использовалась погрешность относительных координат АМ415. Это связано с тем, что погрешность измерения углов курса, крена и тангажа зависит как от фазовых характеристик АМ415, так и от длины базы интерферометра, а погрешность относительных координат АМ415 – только от характеристик антенн. Накопление данных проводилось на интервале  $\approx 7$  часов. Данные измерений обрабатывались в трех режимах: по ГЛОНАСС, по GPS и по совмещенному созвездию ГЛОНАСС/GPS.

На рис. 2 приведены рассчитанные значения коэффициента усиления антенны в диапазоне азимутальных углов  $\varphi$  от  $0^\circ$  до  $360^\circ$  на несущей частоте GPS 1575.4 МГц (а) и ГЛОНАСС 1602 МГц (б) частотного диапазона  $L1$ , где 1 – правая, 2 – левая круговая поляризация. Видно, что антенна слабонаправленная. Коэффициент усиления антенны в зените равен 3дБ. Падение коэффициента усиления от зенита к горизонту составляет около 13дБ. Подавление кроссполаризации в зените составляет свыше 30 дБ на частоте 1575.4 МГц и свыше 25 дБ на частоте 1602 МГц. Активная антенна осуществляет бесперебойный прием навигационных сигналов ГЛОНАСС/GPS в частотных диапазонах  $L1$  и  $L2$  в диапазоне рабочих углов антенны  $\Theta = \pm 85^\circ$ , где  $\Theta = 0$  – зенит ДН антенны.

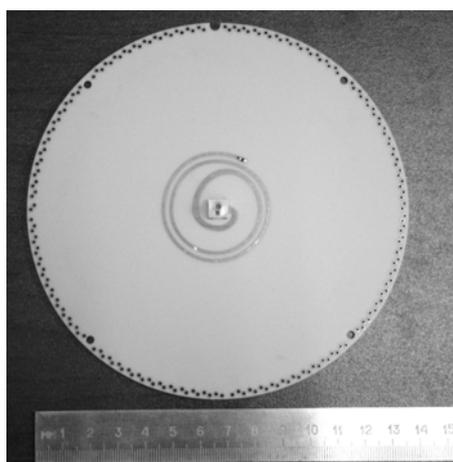
На рис. 3, а, б приведено сравнение нормированных амплитудных ДН антенны в вертикальной плоскости в верхней полусфере на частотах 1575.4 МГц (а) и 1602 МГц (б), где пустые кружки – расчет, заполненные – эксперимент. Видно неплохое совпадение рассчитанных и измеренных ДН в диапазоне рабочих углов возвышения.



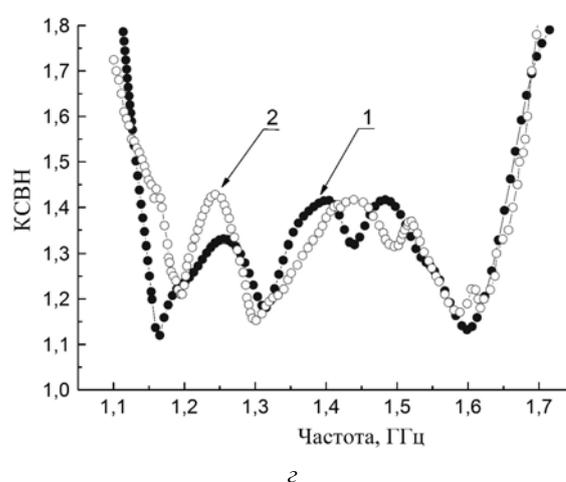
а



б



в



г

Рис. 1. Внешний вид антенного модуля АМ415 (а), фотографии верхней (б) и нижней (в) сторон излучателя щелевой полосковой антенны вытекающей волны и КСВН пассивной антенны (г), где (1) – расчет, (2) – эксперимент

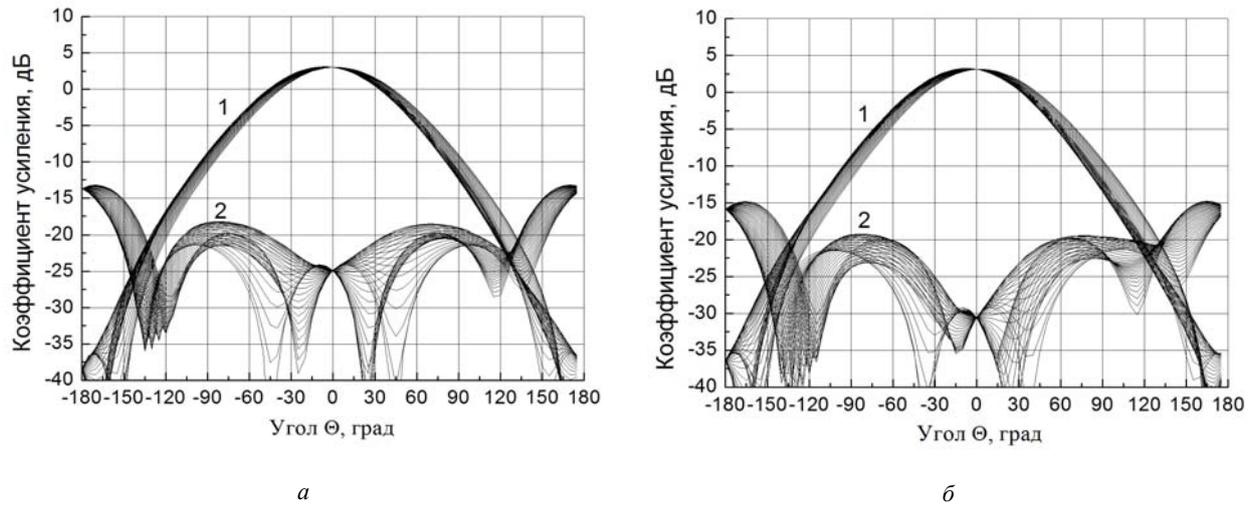


Рис. 2. Коэффициент усиления антенны

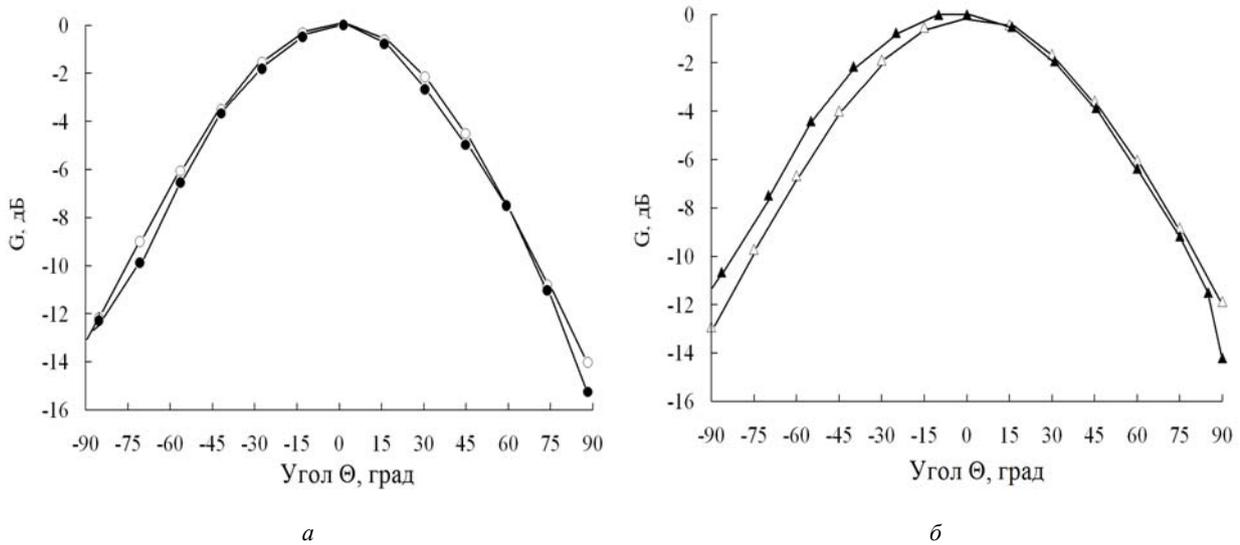


Рис. 3. Сравнение нормированных амплитудных ДН антенны на частоте 1575.4 МГц (а) и 1602 МГц (б): пустые значки – расчет, заполненные – эксперимент

На рис. 4 приведены результаты измерений точности позиционирования одного антенного модуля АМ415 относительно двух других в горизонтальной (а) и вертикальной (б) плоскостях, и соответствующие им распределения ошибки позиционирования (в) и (г). СКО ошибки позиционирования в горизонтальной плоскости составило менее 2,2 мм, в вертикальной – менее 1,7 мм. Видно, что распределения ошибок позиционирования – нормальные.

На рис. 5 приведены сравнения измеренных временных зависимостей точности позиционирования по углам курса (а) и крена (б) разработанных антенных модулей АМ415 (темные точки) и типичных микрополосковых антенн на двухмодовых излучателях

(светлые точки) при расстоянии между центрами трех антенн 2 м. Видно, что точность позиционирования антенных модулей АМ415 по углам курса и крена выше точности позиционирования типичных микрополосковых антенн на двухмодовых излучателях приблизительно в 2 раза.

В таблице приведены СКО ошибки позиционирования антенных модулей АМ415 при измерениях углов курса, тангажа и крена при расстояниях между центрами антенн 2 м, 1 м и 0,7 м. Видно, что при измерении по совмещенному созвездию ГЛОНАСС/GPS СКО ошибки позиционирования по углам курса, крена и тангажа не хуже 9 угловых минут при расстояниях между центрами антенн 0,7 м и 4 угловых минут при расстоянии 2 м.

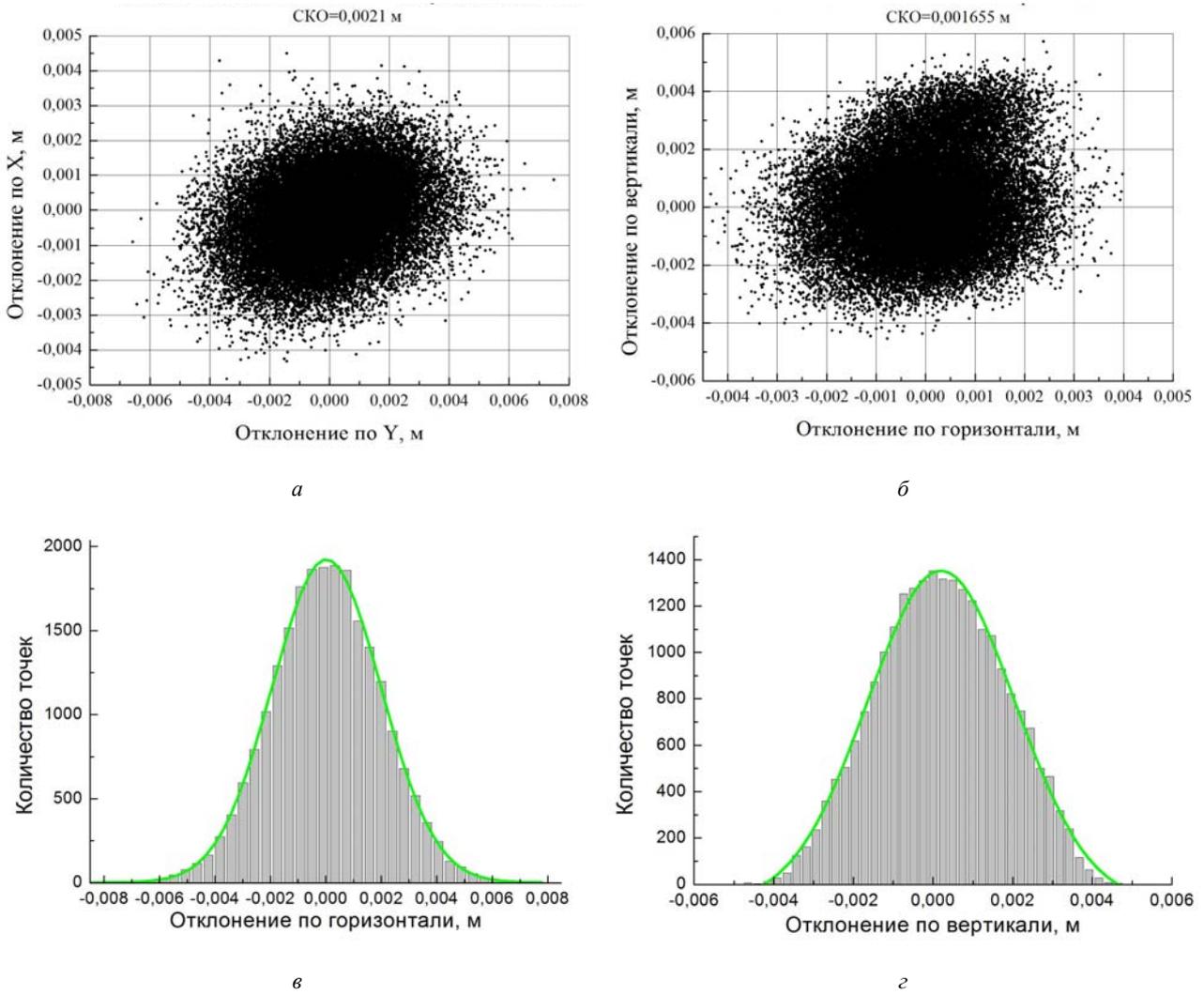


Рис. 4. Точность позиционирования одного антенного модуля AM415 относительно двух других в горизонтальной (а) и вертикальной (б) плоскостях и соответствующие распределения ошибки позиционирования (в) и (г)

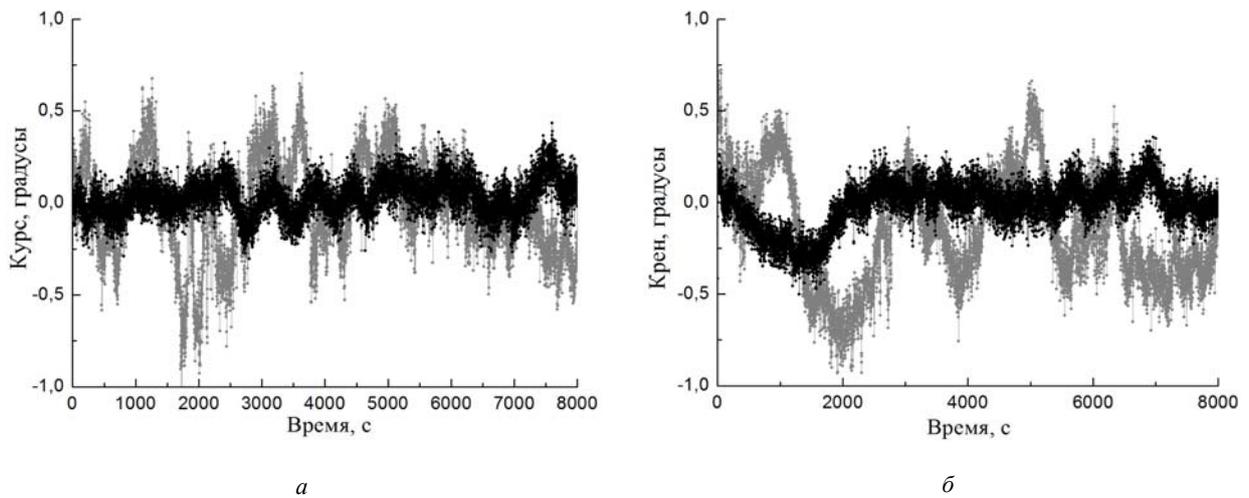


Рис. 5. Временные зависимости точности позиционирования по углам курса (а) и крена (б) с применением трех активных антенн, темные точки – антенные модули AM415, светлые точки – типичные микрополосковые антенны на двухмодовых излучателях

**Точность позиционирования антенных модулей АМ415  
в угломерных измерениях**

ГНСС	Угол	СКО на базе 2 м (угловые минуты)	СКО на базе 1 м (угловые минуты)	СКО на базе 0,7 м (угловые минуты)
Измерения по ГЛОНАСС	курс	4.164	8.1	12.378
	тангаж	4.638	10.002	24.323
	крен	5.394	10.806	26.646
Измерения по GPS	курс	2.718	6.307	7.848
	тангаж	3.282	8.868	9.048
	крен	3.726	9.732	10.218
Измерения по ГЛОНАСС/GPS	курс	2.154	4.32	6.852
	тангаж	3.114	7.266	7.746
	крен	3.812	7.854	8.374

Таким образом, из результатов испытаний видно, что распределение вероятностей погрешности измерений относительных координат антенных модулей АМ415 близко к изотропному, при этом уровень переотраженных сигналов сравним с шумовой составляющей погрешности. При измерении же на микрополосковых антеннах на двухмодовых излучателях в тех же условиях уровень переотраженных сигналов превышает шумовую составляющую в 2–3 раза. Соответственно увеличивается и результирующая погрешность измерений. Для уменьшения влияния отраженных сигналов в микрополосковых антеннах на двухмодовых излучателях применяются экраны, выполненные в виде металлических колец (Choke Ring) [5], что значительно увеличивает габаритные размеры и вес антенных модулей. Исследованные же в настоящей работе антенные модули АМ415 не имеют массивного экрана.

#### Библиографические ссылки

1. Kunysz W. Aperture coupled slot array antenna: pat. 0067315A1 U.S. Appl. №:09/375319; Filed: 16 Aug. 1999; Pub. Date: 6 Jun. 2002.
2. Kunysz W., Badger E., Plamondon D. Leaky wave antenna with radiating structure including fractal loops.: pat. WO 2007/009216 A1 25 January 2007.
3. Щелевая полосковая антенна вытекающей волны с дополнительными щелями с малой электри-

ческой длиной / В. М. Владимиров, А. С. Кондратьев, Ю. В. Крылов и др. // Антенны. 2012. № 11. С. 12–17.

4. Навигационные характеристики щелевой полосковой антенны вытекающей волны / В. М. Владимиров, А. С. Кондратьев, Ю. В. Крылов и др. // Изв. вузов. Физика. 2012. № 8. С. 86–90.

5. Sciré–Scappuzzo F, Makarov S. N. *IEEE transactions on antennas and propagation*. 2009. Vol. 57. No. 1. P. 33–46.

#### References

1. Kunysz W. *Aperture coupled slot array antenna*: pat. 0067315A1 U.S. Appl. №:09/375319; Filed: 16 Aug. 1999; Pub. Date: 6 Jun. 2002.
2. Kunysz W., Badger E., Plamondon D. *Leaky wave antenna with radiating structure including fractal loops*.: pat. WO 2007/009216 A1 25 January 2007.
3. Vladimirov V. M., Kondratyev A. S., Krylov Y. V., Markov V. V., Fedotov P. M., Shepov V. N. *Antenny*, 2012, no. 11, p. 12–17.
4. Vladimirov V. M., Kondratyev A. S., Krylov Y. V., Markov V. V., Fedotov P. M., Shepov V. N. *Russian Physics Journal*, 2013, no. 8, p. 951–955.
5. Sciré–Scappuzzo F, Makarov S. N. *IEEE transactions on antennas and propagation*, 2009, vol. 57, no. 1, p. 33–46.

© Асеев А. Л., Владимиров В. М., Фатеев Ю. Л., Филиппов А. И., Шабанов В. Ф., Шепов В. Н., 2013