

УДК 621.396.946 EDN SGPEMU

## Измерение максимального допустимого уровня мощности входного сигнала навигационного приемника

**И. Ю. Блинов**, *д. т. н., i.blinov@almaz-antey.ru*

*АО «Концерн ВКО «Алмаз–Антей»», Москва, Российская Федерация*

**И. Р. Арсланбеков**, *Arslanbekov\_IR@orkkniikp.ru*

*АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация*

**Аннотация.** В статье представлены результаты натурной проверки навигационного приемника при работе от источника сигнала большой мощности, выполнен анализ возможности приема сигналов с высоким энергетическим уровнем. Измерения проведены на экспериментальном стенде сигналов спутниковых навигационных систем.

Установлено, что для обеспечения приема и обработки сигналов от наземных вспомогательных станций приемниками ГНСС на расстоянии от 200 км от земных станций необходимо использование радиопередающих средств с ЭИИМ не более 100 Ватт. При использовании в наземных станциях мощных радиопередающих устройств необходима доработка (разработка) навигационной аппаратуры потребителей в части включения отдельного радиочастотного тракта для работы по сигналам наземных станций.

**Ключевые слова:** радионавигация, диапазон, радиоприем, частота, мощность

## Measuring the Maximum Permissible Power Level of the Navigation Receiver Input Signal

**I. Yu. Blinov**, *Dr. Sci. (Engineering), i.blinov@almaz-antey.ru*

*JSC Almaz–Antey Aerospace Defense Group, Moscow, Russian Federation*

**I. R. Arslanbekov**, *Arslanbekov\_IR@orkkniikp.ru*

*Joint Stock Company “Russian Space Systems”, Moscow, Russian Federation*

**Abstract.** The article presents the results of a field test of a navigation receiver when operating with a high-power signal source, and analyzes the possibility of receiving signals with a high energy level. The measurements were carried out on an experimental stand for signals from satellite navigation systems.

It has been established that to ensure the reception and processing of signals from ground-based auxiliary stations by GNSS receivers at a distance of 200 km from earth stations, it is necessary to use radio transmitting equipment with an EIRP of no more than 100 Watts. When using powerful radio transmitting devices in ground stations, it is necessary to refine (develop) the consumer navigation equipment to include a separate radio frequency path for working with signals from ground stations.

**Keywords:** radio navigation, range, radio reception, frequency, power

Задача определения координат потребителя, вектора скорости и точного времени в шкале *UTC* или национальной шкале времени Российской Федерации *UTC(SU)* возникает во многих отраслях хозяйственной деятельности. Высокие требования к навигационно-временному обеспечению предъявляются к объектам транспорта, особенно учитывая широкое развитие беспилотных транспортных средств и летательных аппаратов.

Загруженность радиочастотного диапазона, вызванная использованием различных технических средств, сложности электромагнитной совместимости приборов, а также преднамеренные помехи в диапазонах глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) могут вызывать затруднения в получении навигационного решения, а в некоторых случаях могут являться причиной его полного отсутствия.

На территориях с неустойчивой работой ГНСС задача координатно-временного обеспечения может решаться за счет использования дополнительных (альтернативных по отношению к ГНСС) локальных систем навигации (ЛНС).

ЛНС обеспечивают возможность решения навигационных задач в условиях полного или частичного отсутствия сигналов ГНСС [1]. Методы определения координат потребителя по альтернативным радиотехническим системам [2] обеспечивают достаточно высокую точность навигационных решений (от 0,1 до 5 м). Однако при этом обладают недостатком в виде ограниченности зоны покрытия, достигающей 100 м. Такие ЛНС могут использоваться для определения координат низкодинамичных объектов, находящихся внутри складских помещений, ангаров, шахт, тоннелей и т. п.

Увеличение зоны покрытия ЛНС до десятков и сотен километров, особенно в условиях сложной помеховой обстановки, возможно за счет увеличения энергетики радиоканала, связанной в первую очередь с мощностью радиопередающих средств, а также с увеличением коэффициента усиления приемных и передающих антенн.

Необходимо отметить, что использование ЛНС с увеличенной зоной покрытия до сотен километров не исключает одновременного использования сигналов ГНСС, а может являться его функциональным дополнением. Данное уточнение обусло-

вило цель проводимой работы: определение возможности приема и обработки сигналов с различным уровнем без аппаратной доработки навигационной аппаратуры потребителей (НАП).

Особенно актуальной задача приема сигналов с разными энергетическими уровнями становится при необходимости увеличения точности навигационного решения за счет одновременного приема и обработки сигналов как ГНСС, так и ЛНС.

Ввиду большого отличия в эквивалентной изотропной излучаемой мощности (ЭИИМ) радиопередающих устройств, а также длины радиолинии уровень сигнала от наземных станций ЛНС и от спутников ГНСС на входе НАП могут отличаться на десятки децибел.

В ходе работы проводились:

- определение максимальной мощности входного сигнала навигационного приемника, при которой возможна выдача навигационного решения;
- расчет характеристик радиолиний в целях обеспечения одновременного приема и обработки сигналов ГНСС и сигналов от наземных вспомогательных станций.

Необходимо учесть, что приемник сигналов ГНСС — это устройство, обеспечивающее прием и обработку сигналов с низкой энергетикой. Мощность радиосигнала, принимаемого потребителем от НКА «ГЛОНАСС» и «ГЛОНАСС-М», на выходе приемной антенны составляет не менее  $-161$  дБВт для частот поддиапазонов  $L1$  и  $L2$  [3]. Ввиду этого все приемники ГНСС разработаны как радиоприемное устройство (РПУ) с высокой чувствительностью, что, в свою очередь, ограничивает возможность их работы с сигналами с высокой энергетикой.

С целью проведения измерений и натурной проверки возможности реализации функции одновременного приема сигналов, без аппаратной доработки НАП, был собран экспериментальный стенд.

Схемы измерений приведены на рис. 1 и 2.

В качестве источника сигнала использовался векторный генератор *MXG Vector Generator N5182B* с установленной на нем программой, имитирующей сигнал спутника ГЛОНАСС. Несущая частота была установлена 1602 МГц.

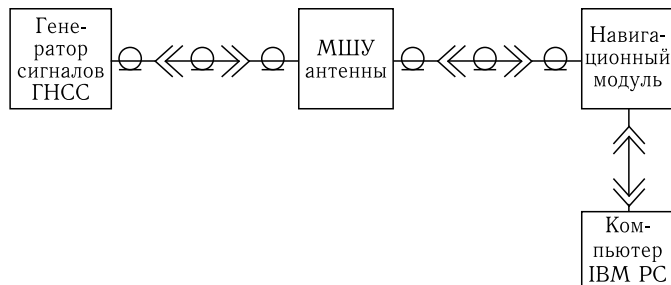


Рис. 1. Схема измерения с использованием МШУ

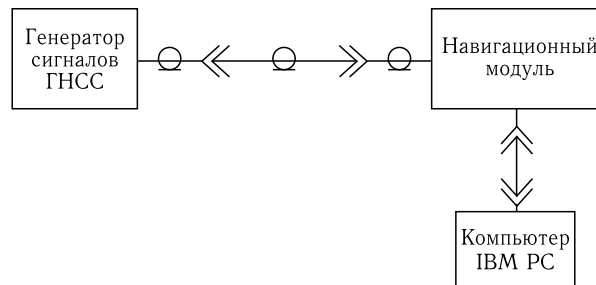


Рис. 2. Схема измерения без МШУ

В качестве приемника использовался модуль навигационный из НАП.

Проверка проводилась в двух вариантах. В первом варианте сигнал с генератора подавался на вход малошумящего усилителя (МШУ) из состава навигационного приемника (рис. 1). Во втором варианте сигнал подавался непосредственно на вход навигационного модуля (рис. 2). В измерениях использовались МШУ с различными коэффициентами усиления.

Работоспособность приемника контролировалась с помощью диагностической программы, установленной на компьютер.

Проверка проводилась в следующем порядке. Изначально на вход приемника подавался сигнал с уровнем мощности, при котором значение энергетического потенциала составляло 35 дБГц, что соответствует уровню  $-136,5$  дБм ( $-165,5$  дБВт). Это минимальный уровень энергетического потенциала, при котором приемник выдает навигационное решение.

Затем уровень выходной мощности генератора повышался до срыва слежения. Одновременно с этим осуществлялся контроль значения энергетического потенциала.

Результаты проверки приведены в табл. 1.

Анализ результатов, приведенных в табл. 1, показывает:

1. При работе навигационного приемника совместно с МШУ перегрузка входных каскадов приемника и срыв слежения за навигационным сигналом спутника происходили при уровне входной мощности порядка  $-101,5$ – $-102,5$  дБм.

2. При работе без МШУ это значение составляет  $-92,5$  дБм.

Диапазон входных сигналов навигационного модуля от минимального уровня, при котором

Таблица 1. Результаты экспериментальной проверки

Мощность на входе ПРМ, дБм	Энергетический потенциал, дБГц (по данным диагностической программы)	Примечание
$-136,5$	35	МШУ 1, $K_y = 20$ дБ
$-131,5$	40	
$-126,5$	45	
$-121,5$	50	
$-116,5$	56	
$-111,5$	61	
$-106,5$	66	
<b><math>-101,5</math></b>	<b>Срыв слежения</b>	
$-136,5$	35	МШУ 2, $K_y = 30$ дБ
$-131,5$	40	
$-126,5$	45	
$-121,5$	50	
$-116,5$	56	
$-111,5$	61	
$-106,5$	66	
<b><math>-102,5</math></b>	<b>Срыв слежения</b>	
$-130,5$	35	Без МШУ
$-125,5$	40	
$-120,5$	45	
$-116,5$	50	
$-111,5$	55	
$-106,5$	60	
$-101,5$	65	
$-96,5$	68	
<b><math>-92,5</math></b>	<b>Срыв слежения</b>	

осуществляется прием навигационных сигналов до срыва слежения, составил 34–35 дБ при работе с МШУ и 38 дБ при подаче сигнала с генератора

непосредственно на вход навигационного модуля. График, построенный по данным табл. 1, приведен на рис. 3.

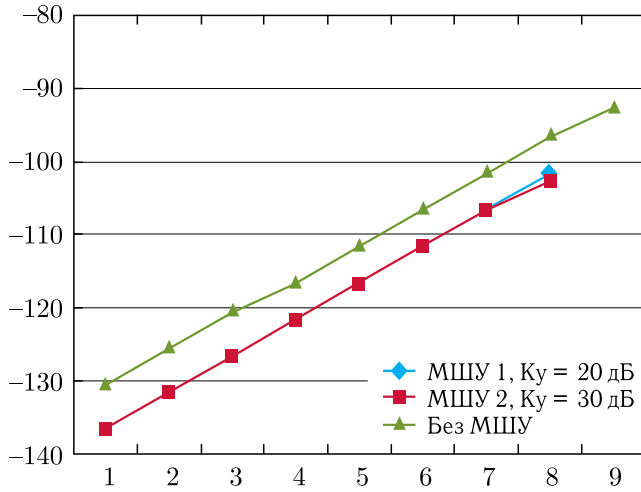


Рис. 3. Мощность сигнала на входе приемника

Известно [4], что в свободном пространстве напряженность поля убывает обратно пропорционально расстоянию от антенны вследствие сферической расходимости фронта волны, из-за чего уменьшается плотность потока мощности, излучаемой передающей аппаратурой.

Ослабление радиочастотных колебаний в свободном пространстве описывается выражением [5]

$$L_0 = \left(\frac{4\pi r}{\lambda}\right)^2 \frac{1}{W_t^2 G_1 G_2}, \quad (1)$$

где  $G_1$  и  $G_2$  — коэффициенты усиления передающей и приемной антенны;  $r$  — расстояние от источника излучения;  $\lambda$  — длина волны излучаемого сигнала;  $W_t$  — множитель ослабления трассы.

С учетом того, что в ходе эксперимента сигнал с генератора подавался непосредственно на вход МШУ (навигационного модуля), коэффициент усиления приемной антенны в дальнейших расчетах не учитывался. Кроме того, коэффициент усиления передающей антенны далее будет учтен в значении ЭИИМ радиопередающего устройства. С учетом изложенных уточнений выражение (1) примет вид:

$$L_0 = \left(\frac{4\pi r}{\lambda}\right)^2. \quad (2)$$

В логарифмическом виде данное выражение имеет вид:

$$L_{0[\text{дБ}]} = 32,4 + 20 \lg(f) + 20 \lg(R), \quad (3)$$

где  $f$  — частота сигнала, МГц;  $R$  — расстояние от источника излучения, км.

Проведем анализ возможности радиоприемного тракта навигационной аппаратуры одновременного приема сигналов наземных вспомогательных систем, а также сигналов ГНСС.

Анализ проведем исходя из уравнения радиопередачи

$$P_2 = P_1 G_1 G_2 \eta_{1\phi} \eta_{2\phi} \zeta_c \zeta_n \left(\frac{\lambda}{4\pi r}\right)^2 W_t^2, \quad (4)$$

где  $P_1$  и  $P_2$  — мощность сигнала на выходе передатчика и входе приемника соответственно;  $\eta_{1\phi}$  и  $\eta_{2\phi}$  — КПД передающей и приемной фидерных линий;  $\zeta_c$  — коэффициент согласования по поляризации сигнала;  $\zeta_n$  — коэффициент согласования по фидеру.

Примем параметры  $\eta_{1\phi}$ ,  $\eta_{2\phi}$ ,  $\zeta_c$ ,  $\zeta_n$  равными 1, что, в свою очередь, будет соответствовать наилучшим условиям приема сигналов от наземных вспомогательных систем.

С учетом всех допущений выражение (4) в логарифмической форме примет вид:

$$\begin{aligned} P_{2[\text{дБ}]} &= P_{\text{ЭИИМ}} - L_{0[\text{дБ}]} = \\ &= P_{\text{ЭИИМ}} - 32,4 - 20 \lg(f) - 20 \lg(R), \end{aligned} \quad (5)$$

где  $P_{\text{ЭИИМ}}$  — ЭИИМ радиопередающего устройства, дБм.

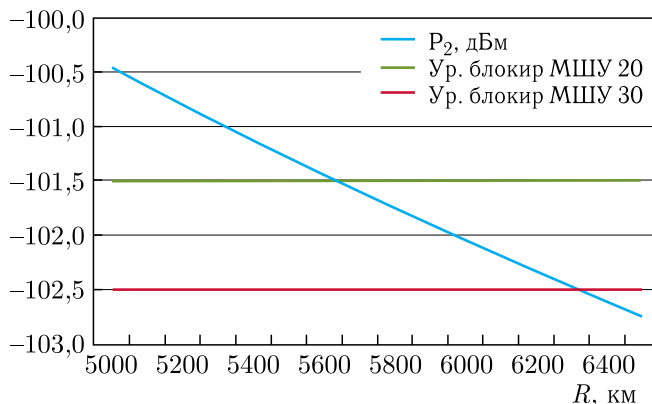
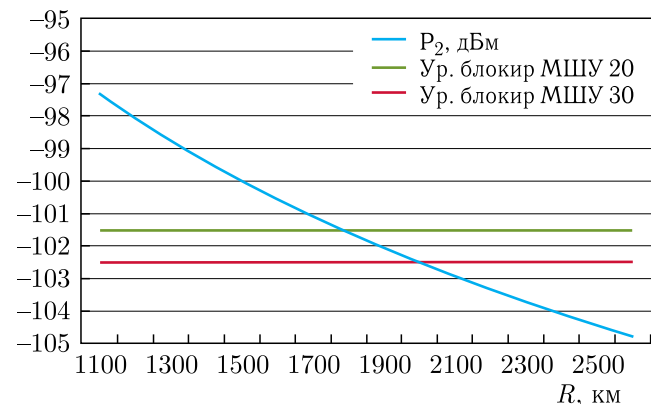
Результаты расчетов для различных значений ЭИИМ при  $f = 1602$  МГц представлены в табл. 2.

Сопоставив значения, представленные в таблице 2, со значениями, полученными в ходе натурной проверки (табл. 1), можно сделать следующее заключение.

1. При ЭИИМ наземной станции 70 дБм (10 кВт) нормальный прием и обработка сигналов возможна на расстояниях прямой видимости более 5700 км для НАП с МШУ 20 дБ и на расстояниях более 6400 км для НАП с МШУ 30 дБ. Зависимость уровня сигнала на входе приемника от расстояния представлена на рис. 4.

Таблица 2. Расчет мощности сигнала на входе приемника

$P_{ЭИИМ} = 70$ дБм		$P_{ЭИИМ} = 60$ дБм		$P_{ЭИИМ} = 50$ дБм		$P_{ЭИИМ} = 40$ дБм	
$R$ , км	$P_2$ , дБм	$R$ , км	$P_2$ , дБм	$R$ , км	$P_2$ , дБм	$R$ , км	$P_2$ , дБм
5000	-100,462	1100	-97,3103	100	-86,4824	10	-76,4824
5100	-100,634	1200	-98,066	200	-92,503	20	-82,503
5200	-100,802	1300	-98,7613	300	-96,0248	30	-86,0248
5300	-100,968	1400	-99,405	400	-98,5236	40	-88,5236
5400	-101,13	1500	-100,004	500	-100,462	50	-90,4618
5500	-101,29	1600	-100,565	600	-102,045	60	-92,0454
5600	-101,446	1700	-101,091	700	-103,384	70	-93,3844
5700	-101,6	1800	-101,588	800	-104,544	80	-94,5442
5800	-101,751	1900	-102,057	900	-105,567	90	-95,5672
5900	-101,899	2000	-102,503	1000	-106,482	100	-96,4824
6000	-102,045	2100	-102,927	1100	-107,31	200	-102,503
6100	-102,189	2200	-103,331	1200	-108,066	300	-106,025
6200	-102,33	2300	-103,717	1300	-108,761	400	-108,524
6300	-102,469	2400	-104,087	1400	-109,405	500	-110,462
6400	-102,606	2500	-104,441	1500	-110,004	600	-112,045
6500	-102,741	2600	-104,782	1600	-110,565	700	-113,384

Рис. 4. Зависимость уровня сигнала на входе приемника от расстояния при  $P_{ЭИИМ} = 70$  дБмРис. 5. Зависимость уровня сигнала на входе приемника от расстояния при  $P_{ЭИИМ} = 60$  дБм

2. При ЭИИМ наземной станции 60 дБм (1 кВт) прием возможен на расстояниях 1800 км (МШУ 20 дБ) и 2000 км (МШУ 30 дБ). Зависимость уровня сигнала на входе приемника от расстояния представлена на рис. 5.

3. При ЭИИМ, равной 50 дБм (100 Вт), прием возможен на расстояниях 600 км (МШУ 20 дБ) и 700 км (МШУ 30 дБ). Зависимость уровня сигнала на входе приемника от расстояния представлена на рис. 6.

4. При ЭИИМ 40 дБм (10 Вт) прием возможен на расстояниях более 200 км от земной станции. Зависимость уровня сигнала на входе приемника от расстояния представлена на рис. 7.

Необходимо дополнительно отметить, что в данных заключениях не учтены параметры ослабления сигнала при распространении на реальных трассах, а также ряд коэффициентов ослабления сигналов. В связи с этим полученные значения могут рассматриваться только как предельные.

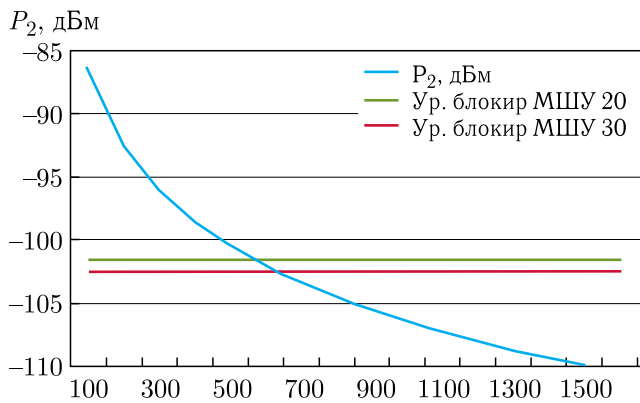


Рис. 6. Зависимость уровня сигнала на входе приемника от расстояния при  $P_{ЭИИМ} = 50$  дБм

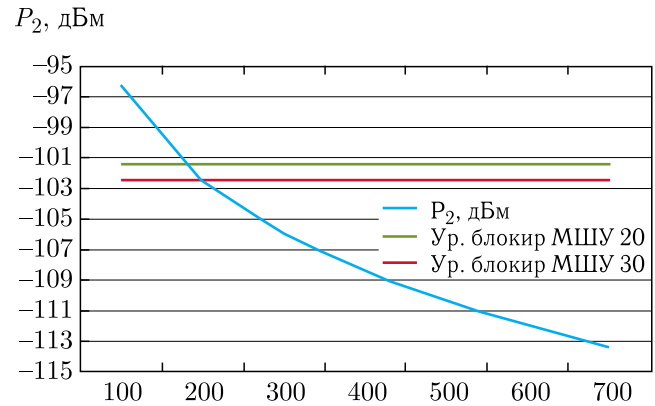


Рис. 7. Зависимость уровня сигнала на входе приемника от расстояния при  $P_{ЭИИМ} = 40$  дБм

## Заключение

Для обеспечения приема и обработки сигналов от наземных вспомогательных станций приемниками ГНСС на расстоянии от 200 км от земных станций необходимо использование радиопередающих средств с ЭИИМ не более 100 Вт. Однако данный подход не позволит обеспечить работу НАП в сложной помеховой обстановке.

При использовании в наземных станциях мощных радиопередающих устройств необходима доработка (разработка) НАП в части включения отдельного радиочастотного тракта для работы по сигналам наземных станций.

В дальнейших работах будут проведены исследования в части влияния условий размещения НАП на качество принимаемых сигналов от станций ЛНС. Кроме того, будут определены коэффициенты ослабления сигналов ЛНС при работе на реальных радиотрассах, а также предложены варианты доработки аппаратуры навигации для осуществления одновременного приема сигналов ГНСС и ЛНС.

## Список литературы

1. *Amundson I., Koutsoukos X.D.* A survey on localization for mobile wireless sensor networks / Eds. R. Fuller, X.D. Koutsoukos Mobile entity localization and tracking in GPS-less environments. Berlin Heidelberg, Springer, 2009. P. 235–254.
2. *Ксендзук А.В., Сурмин Е.А., Качесов В.В., Жданов С.О., Шахалов К.С.* Результаты экспериментальных исследований системы локальной навигации по широкополосным источникам // Вопросы радиоэлектроники. 2020. №5. С. 68–76.
3. Интерфейсный контрольный документ навигационный радиосигнал в диапазонах L1, L2 (редакция 5.1), 2008 г.
4. *Нарышкин Е.М., Серков В.П.* Волновая служба и антенные устройства. Ч. I. М.: Воениздат, 1982. 288 с.
5. *Жуков В.А., Серков В.П., Филиппов В.В., Чернолес В.П.* Радиочастотная служба и антенные устройства. Л.: Военная академия связи, 1989. 264 с.

Дата поступления рукописи  
в редакцию 02.11.2023  
Дата принятия рукописи  
в печать 12.02.2024