УДК 621.396.49

В.Д. Дмитриев, В.В. Терешков, В.Ю. Саяпин, С.Б. Сунцов, М.В. Крат

Макет многоканального приемного модуля системы автономной навигации

Разработан и изготовлен макет многоканального приемного модуля системы автономной навигации для одновременного приема сигналов глобальных навигационных спутниковых систем ГЛОНАСС, GPS, GALILEO и COMPASS в L1-диапазоне. Проведены экспериментальные исследования основных параметров, сделан вывод о возможности построения многоканального приемника на основе интегральных микросхем гетеродинного типа с однократным преобразованием частоты.

Ключевые слова: система навигации, многоканальный приемный модуль, динамический диапазон, коэффициент шума, избирательность по соседнему каналу.

Система автономной навигации (САН) предназначена для координатно-временного обеспечения низкоорбитальных и высокоорбитальных космических аппаратов. Для её реализации требуется создание многоканального приемного модуля (ПМ), позволяющего проводить одновременный прием и обработку сигналов глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) такие, как ГЛОНАСС, GPS, GALILEO и COMPASS, в частотном диапазоне *L*1 согласно таблице [1].

астотный диапазон L1								
Система	Центральная	Полоса частот,						
	частота, МГц	ΜΓц						
ГЛОНАСС	1602	10						
GPS	1575,42	2,046						
GALILEO	1575,42	4						
COMPASS	1561,098	4,092						

Частотный диапазон L1

Одновременный прием следует производить с помощью многоканальной системы с частотным разделением принимаемых сигналов. Для САН число разделяемых каналов должно быть равно трем, т.к. сигналы GPS и GALILEO имеют одинаковую центральную частоту, и их разделение производится в блоке обработки.

ПМ навигационных систем, как и связи, строятся по гетеродинному типу, поэтому разделение частотных каналов можно производить в высокочастотном диапазоне (ВЧ) или на промежуточной частоте (ПЧ) [2]. При построении многоканального ПМ САН с разделением каналов по ВЧ возможно применение разработанных ПМ в монолитно-интегральном исполнении (МИС). Известно достаточно большое число МИС, выпускаемых иностранными фирмами для систем навигации [3]: MAX2769 и MAX2769B – фирмы MAXIM; GP2015 – фирмы ZARLING; MRF1G1505 – фирмы MOTOROLA; CXA1951AQ – фирмы SONY и др.

Как уже отмечалось, МИС ПМ навигационных систем строятся по гетеродинному принципу и содержат необходимые встроенные узлы: малошумящий усилитель (МШУ), смеситель (СМ), гетеродин с синтезатором частот, усилитель промежуточной частоты (ПЧ) с автоматической регулировкой усиления (АРУ). В свою очередь ПМ гетеродинного типа делятся на супергетеродинные с двойным преобразованием частоты и приемники прямого преобразования с однократным преобразованием частоты [3]. По первому принципу построено большинство МИС ПМ для навигационных систем. Приемники с двойным преобразованием частоты обладают высокой избирательностью и чувствительностью, однако требуют подключения внешних высокодобротных полосовых фильтров (ПФ) по ВЧ и ПЧ, что приводит к увеличению стоимости и размеров. Кроме того, в них накладываются дополнительные требования к сигналу гетеродина и линейности смесителя вследствие возможности возникновения комбинационных частот, попадающих в спектр основного сигнала.

В настоящее время в системах связи и навигации все большее применение находят ПМ с однократным преобразованием частоты. Достоинством такой архитектуры является возможность достижения высокой интеграции без использования внешних ПФ. При этом, по сравнению с двойным преобразованием частоты, возрастают требования к избирательности ПФ на ПЧ. Однако эта проблема в последнее время успешно разрешается использованием полифазных фильтров в интегральном исполнении [4].

Указанное решение было реализовано в МИС ПМ фирмы MAXIM – MAX2769B [5], в которой достигается высокая избирательность по соседнему и зеркальному каналам с помощью полифазных фильтров пятого порядка без применения внешних ПФ.

Следует также отметить, что из большого числа МИС ПМ для систем навигации, представленных на рынке, лишь некоторые позволяют производить прием всех сигналов ГНСС (ГЛОНАСС, GPS, GALILEO, COMPASS). В их числе находятся и отмеченная выше МИС MAX2769B. Большинство же МИС ПМ ориентированы на прием только GPS-сигналов.

Таким образом, для САН предпочтительней использовать серийно выпускаемые модули с минимальным числом навесных элементов (МАХ 2769В). Это позволяет уменьшить массогабаритные параметры многоканального ПМ, а также повысить надежность, что особенно важно для систем космического применения.

При построении структурной схемы многоканального ПМ с разделением по ВЧ необходимо также учитывать влияние сигналов гетеродина на соседние каналы. При использовании отмеченных МИС сигналы гетеродинов находятся в области принимаемых сигналов, поэтому необходимо обеспечить дополнительную межканальную развязку, которую можно увеличить путем включения буферных усилителей (БУ). С учетом этого структурную схему ПМ САН с разделением каналов по ВЧ можно представить в виде рис. 1.



Рис. 1. Структурная схема ПМ САН с разделением каналов по ВЧ

Для проверки работоспособности многоканального ПМ САН был разработан макет на основе МАХ2769В. В качестве входного МШУ и БУ был использован усилитель фирмы NEC UPC 8230 [6], имеющий в частотном диапазоне L1 следующие параметры: коэффициент шума $K_{\rm III} = 0,85$ дБ; коэффициент усиления $K_p = 18,5$ дБ; КСВ по входу и выходу 1,7; IP_3 по выходу 13 дБм·Вт. Деление на три канала осуществляется с помощью синфазного делителя фирмы MiniCircuit SCN-3-16 [7], имеющего в данном частотном диапазоне прямые потери не более 0,6 дБ и развязку между каналами не хуже 20 дБ.

Отличительными особенностями ПМ МАХ2769В являются наличие встроенных высокоизбирательных ПФ по ПЧ, а также фазовый метод подавления зеркального канала, поэтому при макетировании не были использованы дополнительные фильтры П Φ_1 , П Φ_2 и П Φ_3 по ВЧ. Помехозащищенность от сигналов, не относящихся к ГНСС, обеспечивается ПАВ-фильтром ФП-592 1587В51 [8], имеющим полосу пропускания 58 МГц.

Важнейшими параметрами многоканального ПМ САН являются коэффициент шума К_ш, определяющий чувствительность, и динамический диапазон, оценивающий способность одновременного приема сигналов от объектов, находящихся на разных орбитах. Динамический диапазон для системы САН должен быть не менее 40 дБ. Он определяется входными цепями ПМ. Оценка суммарного коэффициента шума и динамического диапазона была произведена для структурной схемы, изображенной на рис. 2.



Для расчета суммарного коэффициента шума была использована известная формула Фрииса [9]:

$$K_{\rm III} = 1 + (K_{\rm III1} - 1) + \frac{(K_{\rm III2} - 1)}{K_{\rm p1}} + \frac{(K_{\rm III3} - 1)}{K_{\rm p1} \cdot K_{\rm p2}} + \dots$$
(1)

Расчет динамического диапазона производится по известному выражению [9]

$$\mathcal{A}_{\rm HMH} = \frac{2}{3} \cdot (IP_3 - P_{\rm min}), \qquad (2)$$

где $P_{\min} = -174 \,\mathrm{д}\mathrm{E} + \Delta f(\mathrm{d}\mathrm{E}) + K_{\mathrm{III}} (\mathrm{d}\mathrm{E}) + K_p (\mathrm{d}\mathrm{E}),$

$$\frac{1}{IP_3} = \frac{1}{IP_{31}} + \frac{K_{p1}}{IP_{32}} + \frac{K_{p1} \cdot K_{p2}}{IP_{33}} + \dots$$

*IP*_{3*i*} – точка пересечения основной и комбинационной составляющих третьего порядка отдельного каскада.

Результаты расчета по выражениям (1), (2) дают следующие значения: $K_p = 57$ дБ, $K_{\rm III} = 1,4$ дБ, $P_{\rm min} = -38,4$ дБм·Вт, $IP_3 = 9,96$ дБ, $Д_{\rm ими} = 32,2$ дБ. Таким образом, включение БУ приводит к увеличению суммарного коэффициента усиления и снижению динамического диапазона. Следует отметить, что без использования БУ динамический диапазон составлял 44 дБ, но при этом развязка между каналами по цепям гетеродина была не более 45 дБ. Для обеспечения требуемого динамического диапазона (не менее 40 дБ) между БУ и МШУ МАХ 2769В был включен резистивный аттенюатор с коэффициентом затухания –12 дБ. Это позволило уменьшить суммарный коэффициент усиления входной ВЧ-цепи многоканального ПМ до 45 дБ и повысить динамический диапазон до 41 дБ, кроме того, развязка по цепям гетеродина между каналами стала более 80 дБ.

На основе структурной электрической схемы, представленной на рис. 1, был разработан макет многоканального ПМ САН, фотография которого представлена на рис. 3.



Рис. 3. Внешний вид многоканального ПМ

В ходе эксперимента были измерены основные характеристики многоканального ПМ: частотная зависимость коэффициента передачи, коэффициент шума, коэффициент отражения по входу, избирательность по соседним каналам, динамический диапазон, межканальная развязка по цепям гетеродина и диапазон регулировки АРУ. На рис. 4 представлена частотная зависимость коэффициента передачи |S21| и коэффициента отражения |S11| общего канала ПМ, включающего МШУ и ПАВфильтр. Из представленного графика видно, что ПАВфильтр совместно с МШУ обеспечивает достаточно высокую избирательность и согласование с 50-омным трактом (КСВ не более 1,4). Измеренный коэффициент шума в частотном диапазоне 1550–1610 МГц не превышает 1,55 дБ, что близко к расчету.

Основной задачей при проведении экспериментальных исследований многоканального ПМ САН являлась оценка возможности получения избирательности по соседним каналам с помощью встроенных в МИС МАХ 2769В программируемых полифазных фильтров по ПЧ без применения дополнительных внешних фильтров. С этой целью отмеченные фильтры были запрограммированы как полоснопропускающие фильтры (ППФ) 5-го порядка, имеющие наилучшие избирательные характеристики. Кроме отмеченного вида, полифазные фильтры можно программным способом реализовать как ППФ 3-го порядка или ФНЧ 3-го и 5-го порядка.

19



Рис. 4. Зависимость |S21| и |S11| общего канала ПМ от частоты

В канале ГЛОНАСС ППФ был настроен на центральную частоту 9 МГц с полосой пропускания 8 МГц, в каналах GPS (GALILEO) и COMPASS центральная частота и полоса пропускания составляли 4 МГц.

На рис. 5 и 6 приведены экспериментально полученные характеристики частотной зависимости ППФ-канала ГЛОНАСС и каналов GPS, COMPASS. Следует отметить, что результаты соответствуют характеристикам, представленным в описании MAX 2769В [3]. Отличительной особенностью ППФ 5-го порядка является высокая избирательность, так, при отстройке от крайней частоты полосы пропускания на 6 МГц затухание составляет не менее 40 дБ. Кроме того, как отмечалось выше, в МИС MAX2769B осуществляется фазовый метод подавления зеркального канала, которое составляет не менее 25 дБ.

Результаты экспериментального исследования показали, что развязка между каналами GPS и COMPASS составила не мене 60 дБ, а между каналами ГЛОНАСС и GPS – более 70 дБ. Таким образом, необходимая избирательность (40 дБ) между соседними каналами была достигнута без применения дополнительных внешних фильтров.

Оценка динамического диапазона производилась при двухчастотном входном воздействии и составила не менее 40 дБ. Ослабление сигнала гетеродина в соседних каналах было не менее 87 дБ, что практически исключало его влияние на прием основного сигнала.

На основании проведенных исследований был сделан вывод о возможности построения многоканального ПМ САН с разделением каналов по ВЧ на основе МИС с однократным преобразованием частоты, что позволяет существенно уменьшить число используемых компонент и упростить настройку ПМ.

RE 50.0 ar	SENSE INT REC	EE TRK & ALIGNAUTO	05:35:10 AM 3 in 01, 2007	
ference Level 0.00 dBm		Avg Type: Log-Pwr	TRACE 1 2 3 4 5 6	Trace/Det
IFGain:Low	" Ing: Free Run #Atten: 10 dB	Avg Hold:>100/100	Mkr1 3.00 MHz -59.525 dBm	Select Trace 1
.0				Clear Writ
.0				Trace Averag
.0 .0	haymateria (abbiliteda)	Marrie		Max Hol
o typesta and the second		No. of the second secon		Min Ho
.0			Manage and the addition of the second s	View/Blank Trace On
nter 10.01 MHz es BW 68 KHz VBW	58 kHz*	Sweep	Span 20.00 MHz 50.0 ms (1001 pts)	Mor 1 of

Рис. 5. Частотная характеристика ППФ-канала ГЛОНАСС

Agilent Spec	trum Analyzer - Swept	SA								
Span 7	RF 50 Ω			SE	NSE:INT RF (Avg Type	ALIGNAUTO	05:15:07 A	M Jun 01, 2007	Trace/Det
10 dB/div	v Ref 0.00 dE	IFC Bm	Gain:Low	Trig: Fre Atten: 10	e Run I dB	Avg Hold:	>100/100 Mkr	۳۸ ۵ 1 3.000 -31.9	00 MHz 84 dBm	Select Trace 1
-10.0	2	7		2				-		Clear Write
-20.0 -30.0				AAAAAAA	<u>8440440</u>	νολήλητα		-		Trace Average
-40.0		ANNAN	AAAAAAA	AAAAAAAA	AAAAAAA	AAAAAAA	MANA	W.		Max Hold
-60.0	MANY MANY							"WAA	WHUMAN	Min Hold
-80.0		1						5		View/Blank Trace On
Center #Res B	4.000 MHz W 68 KHz		VBW	58 kHz*			Sweep	Span 7 50.0 ms (.950 MHz 1001 pts)	More 1 of 3
MSG							STATUS	Source	Uncal;adj St	art Freq RBW Points

Рис. 6. Частотная характеристика ППФ-каналов GPS и COMPASS

Работа выполнена в рамках реализации постановления Правительства РФ от 09.04.2010 г. № 218 и договора между ОАО «ИСС» и Минобрнауки РФ от 12.02.2013 г. № 02.G 25.31.0042.

Литература

1. A Dual-Channel GPS/Compass/Galileo/GLONASS Reconfigurable GNSS Receiver in 65 nm CMOS / N. Qi, Y.Xu, B. Chi, X.Yu, X.Zhang, Z. Wang. // Custom Integrated Circuits Conference, Sep. 2011. – San Jose, California, USA, 2011. – P. 49–53.

2. Поволяев Е. Системы спутниковой навигации ГЛОНАСС и GPS. – Ч. 2. Аппаратура потребителей системы / Е. Поволяев, С. Хуторной // Chip News. – 2002. – № 1. – С. 4–10.

21

3. Damman A. GSA-227890 Grammar D.1.4 Version 1.17 Gap Analysis of GNSS Receivers and Technology / A. Damman, I. Groh, C. Mensing, S. Sand, M. Detratti, S. Lohan, H. Hurskainen, H. Lep-pakosti. – 2012. – 71 р. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.kn-s.dlr.de/grammar/ documents/documents/D14.pdf, свободный (дата обращения: 10.06.2013).

4. Hornak T. Using polyphase filters as image attenuators // RF Design. – 2001. – № 6. – P. 26–34.

5. Maxim Integrated. MAX 2769B Universal GPS Receiver. Product Datasheet [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.maximintegrated.com/MAX2769B.retated.,свободный (дата обращения: 10.04.13).

6. California Eastern Labs (CEL). Bipolar Analog Integrated Circuit UPC 8230TU. Product Datasheet [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http:// www.cel.com, свободный (дата обращения: 05.07.2013).

7. Mini-Circuits. Power Splitter / Combiner SCN-3-16. Product Datasheet (HTML) [Электронный pecypc]. – Режим доступа: http:// www.minicircuits.com, свободный (дата обращения: 19.06.2013).

8. Каталог фильтров на поверхностных акустических волнах (ПАВ) в МТУСИ. Официальный сайт лаборатории акустоэлектронных устройств (НИП 330 в НИЧ МТУСИ) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http:// www.saw-filters.ru, свободный (дата обращения: 25.05.2013).

9. Chang K. RF and Microwave Wireless System. – N.Y.: John Wiley & Sons, Inc, 2000. – 355 p.

Дмитриев Владимир Дмитриевич

Канд. техн. наук, доцент каф. телекоммуникации и основ радиотехники ТУСУРа Тел.: (382-2) 41-33-98 Эл. почта: dvd51@mail.ru

Терешков Виктор Владимирович

Аспирант каф. радиотехнических систем ТУСУРа Тел.: (382-2) 41-33-98 Эл. почта: goodvictor90@gmail.com

Саяпин Вячеслав Юрьевич

Аспирант каф. радиотехнических систем ТУСУРа Тел.: 8-923-425-03-27 Эл. почта: nasl@sibmail.com

Сунцов Сергей Борисович

Нач. отдела ОАО «Информационные спутниковые системы (ИСС)» им. акад. М.Ф. Решетнева Тел.: 8-913-562-8286 Эл. почта: sbsun@iss-reshetnev.ru

Крат Михаил Викторович

Вед. инженер ОАО «ИСС» Тел.: 8-913-507-1096 Эл. почта: krat@iss-reshetnev.ru

Dmitriev V.D., Tereshkov V.V., Sayapin V.Y., Suntsov S.B., Krat M.V. Multi-channel RF down-converter prototype unit for autonomous navigation system

In this research, the authors designed and manufactured a prototype unit of multichannel receiver module system for autonomous navigation which provides the concurrent reception of Global Navigation Satellite System (GNSS) signals (GLONASS, GPS, GALILEO and COMPASS) in L1-band. The experimental tests of the basic parameters were carried out. Rationale for choosing was obtained about design features of multichannel receiver with integrated VCO circuits and single frequency conversion.

Keywords: navigation system, multichannel receiver, dynamic range, noise figure, adjacent channel selectivity.