Экспериментальное исследование энергетических потерь схемы формирования группового навигационного сигнала ГЛОНАСС

Experimental study on the energy losses of the GLONASS group navigation signal generator scheme

Астахов / Astakhov D.
Дмитрий Анатольевич
(otdelenie_74@spacecorp.ru)
АО «Российские Космические Системы»,
начальник отделения.
г. Москва

Кудряшов / Kudryashov M.
Михаил Федорович
(otdelenie_74@spacecorp.ru)
АО «Российские Космические Системы»,
начальник отдела.
г. Москва

Ткачев / Tkachev A.
Александр Борисович
(otdelenie_74@spacecorp.ru)
кандидат технических наук.
АО «Российские Космические Системы»,
ведущий инженер.
г. Москва

Гончаров / Goncharov O.
Олег Александрович
(otdelenie_74@spacecorp.ru)
АО «Российские Космические Системы»,
инженер-исследователь 2 категории.
г. Москва

Ключевые слова: глобальная навигационная спутниковая система – global navigation satellite system; ГЛОНАСС – GLONASS; цифровая обработка сигналов – digital signal processing; нелинейное цифровое уплотнение – nonlinear digital compaction; энергетические потери – energy loss.

Данная статья посвящена экспериментальной проверке способа формирования группового навигационного сигнала ГЛОНАСС, объединяющего сигналы с частотным и кодовым разделением. Для достижения поставленной цели был создан лабораторный стенд, с помощью которого были проведены измерения параметров энергетических потерь при формировании группового выровненного навигационного сигнала, а также соотношения мощностей сигнальных компонент при прохождении через ограничитель. В статье проведено сравнение результатов теоретических и экспериментальных исследований проблемы формирования группового навигационного сигнала.

This article is devoted to experimental verification of the method of forming the GLONASS group navigation signal, combining signals with frequency and code division. To achieve this goal, a laboratory bench was created, which was used to measure the energy loss parameters during the formation of a group aligned navigation signal, as well as the power ratio of the signal components passing through the limiter. The article compares the results of theoretical and experimental studies on the formation of a group navigation signal.

Введение в системе ГЛОНАСС новых сигналов с кодовым разделением в диапазонах L1, L2, L3 должно происходить наряду с излучением старых сигналов с частотным разделением в диапазонах L1, L2 [3].

В настоящее время в системе ГЛОНАСС применяется излучение сигналов с частотным разделением (ЧР) L1F, L2F и сигналов с кодовым разделением (КР) L1C, L2C, L3C через разные антенны.

Вследствие того, что навигационный космический аппарат (НКА) в процессе своего движения по орбите непрерывно поворачивается вокруг своей оси, ориентированной на Землю так, чтобы его солнечные батареи постоянно смотрели на Солнце, положение фазового центра каждой антенны относительно центра масс НКА будет меняться, и будет зависеть от текущей ориентации НКА в пространстве.

Это приводит к необходимости учитывать в аппаратуре потребителя положение каждой антенны относительно направления на КА, что усложняет алгоритм и снижает потенциальную точность навигационных определений.

Таким образом, возникает задача излучения через одну общую антенну пяти сигналов, из которых два являются сигналами с частотным разделением (ЧР) в диапазонах L1, L2, и три являются сигналами с кодовым разделением (КР) в диапазонах L1, L2 и L3.

Известным техническим решением проблемы объединения сигналов для их излучения через общую антенну является использование диплексера, объединяющего сигналы непосредственно на несущих частотах. Однако для такого объединения требуется иметь достаточно большой частотный

3 2019 □□□□□□□.indd 39 19.09.2019 11:06

Таблица 1

Параметры навигационных сигналов

Сигналы	Разделение сигналов	Диапазон частота сигнала
L1F	Частотное	1602±6 МГц
L1C	Кодовое	1600,995±7,5 МГц
L2F	Частотное	1246±6 МГц
L2C	Кодовое	1248,06 ±7,5 МГц

разнос между несущими колебаниями объединяемых сигналов. Иными словами, с помощью диплексера можно объединять только сигналы из разных частотных диапазонов.

В ситуации, которая складывается в настоящее время в системе ГЛОНАСС, требуется объединять в групповой сигнал компоненты КР и ЧР, располагающиеся в одном и том же частотном диапазоне, как в L1, так и в L2. В таблице 1 показаны значения несущих частот сигналов КР и ЧР.

При этом для выполнения требований, предъявляемым к навигационным сигналам, необходимо обеспечить разное соотношений мощностей компонент с ЧР и КР в излучаемом суммарном навигационном сигнале.

Следует учитывать, что простое суммирование различных сигналов порождает изменение амплитуды их суммы.

В то же время для эффективной работы выходных усилителей мощности на борту навигационного космического аппарата они должны работать в режиме насыщения (различие между режимом насыщения и линейным режимом твердотельных УМ достигает 3..5 дБ). Однако это возможно только при постоянной амплитуде передаваемого сигнала. Постоянство амплитуды обеспечивается как для сигналов с ЧР, так и для сигналов с КР. Тем не менее, амплитуда суммы сигналов непостоянная величина.

Обозначив α^2 отношение мощности сигнала с ЧР к единичной (для простоты) мощности сигнала с КР, получаем, что суммарная амплитуда сигналов $S_\Sigma(t)$ равна

$$\left|S_\Sigma(t)\right| = \left|1 + \alpha e^{j\varphi}\right|, \tag{1}$$

где φ – разность фаз сигналов с ЧР и КР, которая распределена равномерно в $[0, 2\pi)$ (следствие различия частот). Максимальное и минимальное значения амплитуды при $\alpha < 1$ равны $A_{\max} = 1 + \alpha$, $A_{\min} = 1 - \alpha$. Коэффициент амплитудной модуляции равен

$$m_{AM} = \frac{A_{\max} - A_{\min}}{A_{\max} + A_{\min}} = \alpha. \tag{2}$$

Например, если мощность сигнала с ЧР вдвое меньше, чем у сигнала с КР, то

$$m_{AM} = \alpha = \sqrt{1/2} = 0,707; \tag{3}$$

Если мощности сигналов ЧР и КР равны, то $m_{AM} = 1$, т.е. амплитудная модуляция сигнала значительна.

В [1, 2] теоретически показано, что групповой навигационный сигнал может быть синтезирован методом оптимального выравнивания. Суть этого метода состоит в том, что суммарный (не выровненный) групповой сигнал пропускается через идеальный амплитудный ограничитель. Оптимальное выравнивание обеспечивает минимум коэффициента потерь, который равен отношению дополнительной мощности, необходимой для выравнивания сигнала, к мощности выровненного (излучаемого) сигнала, т.е. характеризует относительные потери мощности.

В [1, 2] доказано, что для сигналов с симметричным распределением значений суммарного (выравниваемого) сигнала на комплексной плоскости оптимальное выравнивание соответствует алгоритму

$$S_{out}(t) = \mathrm{sign}\{S_\Sigma(t)\}, \tag{4}$$

где $S_{out}(t)$ – комплексная амплитуда выровненного сигнала. Операция $\mathrm{sign}(x)$ для комплексного аргумента – это

$$\mathrm{sign}(x) = \frac{x}{|x|} = \exp\left(j \cdot \arg(x)\right). \tag{5}$$

где x представляет собой сумму двух независимых радиосигналов, например L1C+L1F.

Оптимальное выравнивание приводит к искажениям в компонентных сигналах, что порождает энергетические потери в приемной аппаратуре. В работах [3, 4, 5, 6, 8] были предложены различные варианты технической реализации указанного метода формирования. В [8] было проведено программное моделирование формирования выровненного группового сигнала, по результатам которого показано, что величина энергетических потерь может составлять от 13% до 19% в зависимости от требуемого соотношения мощностей сигналов с кодовым и частотным разделением на входе формирователя.

Целью настоящей работы является экспериментальная проверка и уточнение величины энергетиче-

ских потерь при формировании выровненного суммарного сигнала, представленных в теоретических работах [1, 2, 3, 8]. Актуальность экспериментального уточнения величины энергетических потерь обусловлена сильным её влиянием на энергетический и тепловой бюджет конечной бортовой аппаратуры, что в конечном итоге определяет физическую возможность создания такой бортовой аппаратуры для работы в условиях открытого космоса.

Для практического исследования энергетических потерь при выравнивании суммы двух радиосигналов (например, L1C+L1F) был собран лабораторный стенд, состоящий из генератора сигналов произвольной формы, анализатора спектра и управляющего компьютера.

В соответствии со структурой [5] была разработана программная модель формирования суммарного выровненного сигнала [7], которая загружалась на генератор сигналов произвольной формы.

В стенде исследуемый сигнал формируется генератором сигналов произвольной формы, управляемого персональным компьютером, и поступает на анализатор спектра, где производится измерение мощностей уплотняемых компонент и полной мощности выровненного сигнала.

Для того чтобы измерить величину энергетических потерь суммарного выровненного радиосигнала, в модели формирования [7] задавалось разное соотношение мощностей (α^2) сигналов КР и ЧР на входе идеального ограничителя (1). Номиналы частот соответствуют сигналу с частотным разделением L1F на литере 6 и сигналу с кодовым разделением L1C на номинальной частоте. Эти радиосигналы модулированы псевдослучайной последовательностью (ПСП) сигналов ГЛОНАСС с символьной частотой 511 кГц и длительностью периода 1 мс, вид модуляции – BPSK.

Спектр выходного суммарного выровненного сигнала в полосе частот 10,7 МГц представлен на рис. 1, а в полосе частот 160 МГц – на рис. 2.

Величина потерь определяется выражением (6):

$$P_{\text{цот}} = 1 - \frac{P_1 + P_2}{P_{chan}} \qquad (6)$$

где:

P_1, P_2 – уровни мощности каждого радиосигнала после выравнивания, $P_1 = P_{Mkr1} \times f_S$, где P_{Mkr1} – значение мощности максимума основного лепестка в ваттах в полосе 1 Гц (Mkr1=66,715 dBm/Hz на рис. 1)

$P_2 - P_{Mkr2} \times f_S$, где P_{Mkr2} – значение мощности максимума основного лепестка в ваттах в полосе 1 Гц (Mkr2=69,757 dBm/Hz на рис. 1)

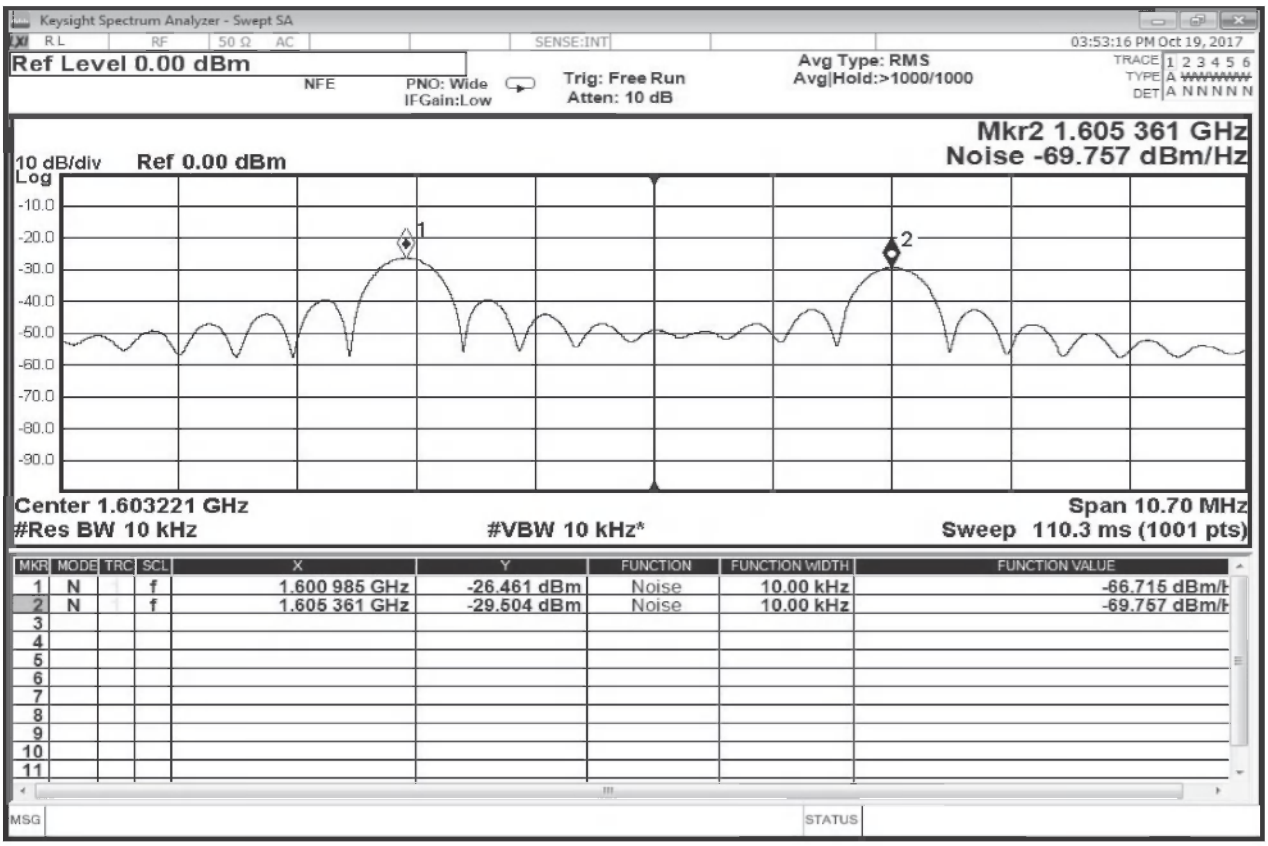

Рис. 1. Спектр суммарного выровненного выровненного сигнала в полосе частот 10,7 МГц

3 2019 □□□□□□□.indd 41 19.09.2019 11:06

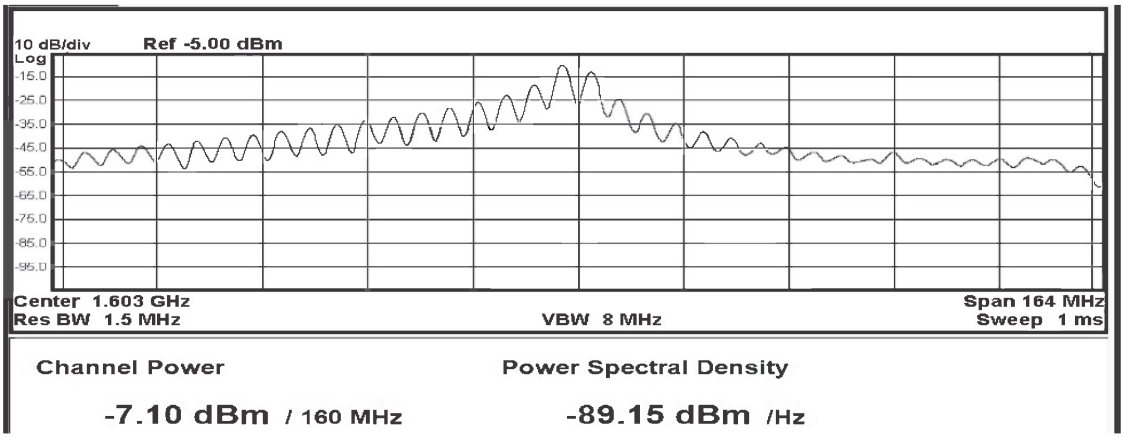

Рис. 2. Спектрограмма сформированного суммарного выровненного сигнала с отображением функционала измерения канальной мощности в режиме «Channel Power»

Таблица 2

Теоретические и экспериментальные значения проведенного исследования

Теоретические значения			Экспериментальные значения					
$PR_{вых\ теор}$	α	α^2	P_1, пВт/Гц	P_2, пВт/Гц	P_{chan}, мкВт/Гц	$PR_{вых\ изм}$	$L_П$, %	$L_Т$, %
0.05	0.417317	0.1741	175.22	8.5368	96.81	0.0487	3.01	4.25
0.10	0.555873	0.3089	140.98	13.936	85.35	0.0989	7.25	7.39
0.15	0.645662	0.4168	129.74	18.893	82.98	0.1456	8.47	9.77
0.20	0.710837	0.5052	120.62	23.536	83.20	0.1951	11.46	11.63
0.25	0.760966	0.5791	114.72	27.608	83.36	0.2407	12.75	13.10
0.30	0.800949	0.6415	105.78	31.078	80.93	0.2938	13.59	14.28
0.35	0.833652	0.695	104.72	35.058	84.06	0.3348	15.03	15.24
0.40	0.860900	0.7411	100.14	39.576	84.08	0.3952	15.09	16.02
0.45	0.883923	0.7813	92.372	40.568	79.81	0.4391	14.88	16.65
0.50	0.903585	0.8165	90.060	43.812	82.27	0.4865	16.85	17.17
0.55	0.920518	0.8474	87.121	46.689	82.43	0.5359	17.05	17.60
0.60	0.935191	0.8746	79.340	48.320	79.25	0.609	17.69	17.94
0.65	0.947961	0.8986	79.592	50.999	81.24	0.6408	17.86	18.22
0.70	0.959104	0.9199	72.577	50.900	77.07	0.7013	18.13	18.44
0.75	0.968831	0.9386	73.701	53.445	79.90	0.7251	18.68	18.61
0.80	0.977306	0.9551	74.365	57.645	81.62	0.7752	17.35	18.74
0.85	0.984647	0.9695	72.016	59.743	81.44	0.8296	17.33	18.83
0.90	0.990926	0.9819	69.713	60.057	80.73	0.8614	17.86	18.90
0.95	0.996159	0.9923	67.143	60.618	80.76	0.9028	19.16	18.93
1.00	1.000000	1	66.713	64.637	80.56	0.9689	16.68	18.94

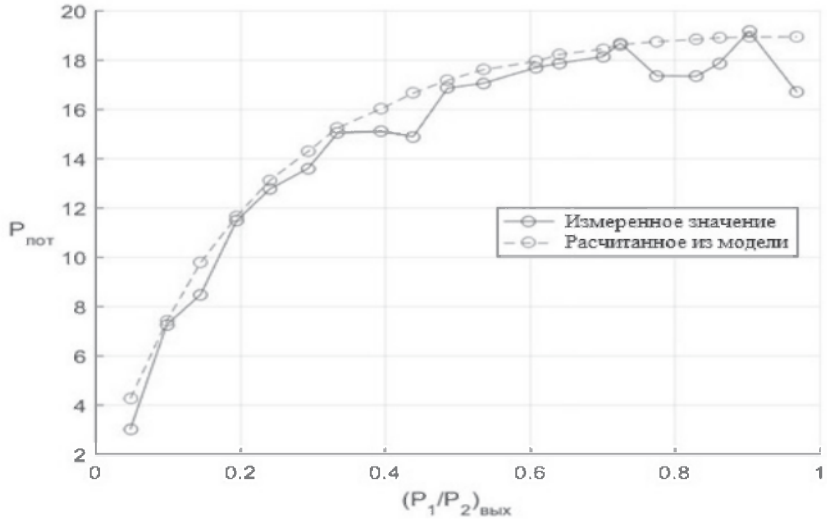

Рис. 3. График зависимости величины потерь от выходного (измеренного) соотношения мощности компонент сигнала

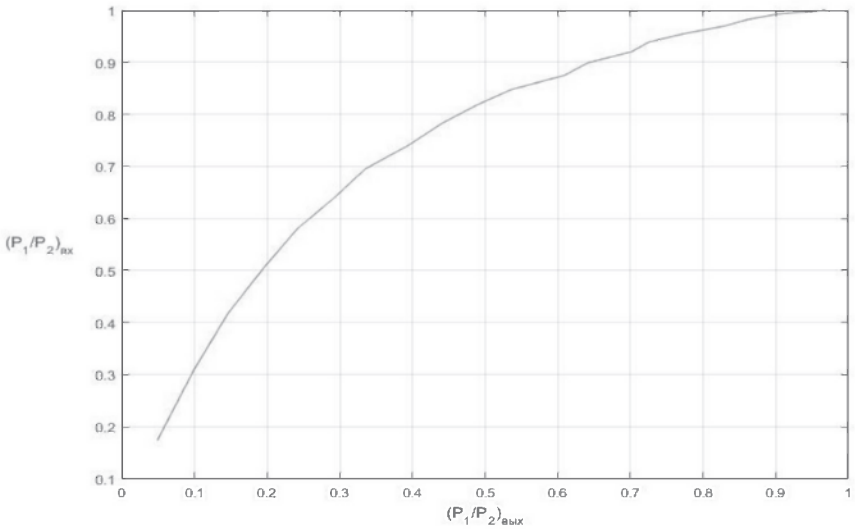

Рис. 4. Соотношение мощностей сигнала на входе от значения на выходе нелинейного ограничителя

3 2019 □□□□□□□.indd 43 19.09.2019 11:06

P_{chan} – измеренная на анализаторе спектра величина полной мощности выровненного сигнала (на рис. 2 соответствует значению «Channel Power» (−7,1) dBm);

$f_s = 511$ *кГц* – частота следования символов ПСП;

Теоретические и экспериментальные значения проведенного исследования представлены в таблице.

Теоретические значения были взяты из расчетов, представленных в работе [8]. Практические значения были получены путем измерения величины мощности каждой из частот с помощью установки маркеров на рассматриваемые частоты, соответствующие сигналам с частотным и кодовым разделениям (таблица 2).

$PR_{\text{вых теор}}$ – теоретическое отношение мощностей P_1/P_2 на выходе идеального ограничителя;

α – отношение амплитуд на входе нелинейного ограничителя;

α^2 – теоретическое отношение мощностей P_1/P_2 на входе нелинейного ограничителя;

P_1, P_2 – измеренные уровни мощности сигналов на выходе идеального ограничителя;

P_{chan} – измеренное значение канальной мощности встраиваемыми средствами анализатора спектра;

$PR_{\text{вых изм}}$ – измеренное значение отношение мощностей P_1/P_2 на выходе идеального ограничителя;

$L_{\text{П}}$ – измеренный коэффициент потерь мощности на выходе идеального ограничителя;

$L_{\text{Т}}$ – теоретический коэффициент потерь мощности на выходе идеального ограничителя [8]);

Из полученных значений таблицы 2 построен график зависимости потерь мощности при нелинейном суммировании сигналов от соотношения мощностей на выходе ограничителя (рис. 3). Также представлен график зависимости соотношение мощностей сигнала на входе и выходе идеального ограничителя (рис. 4).

Полученные результаты измерения параметров энергетических потерь при приеме группового выровненного навигационного сигнала подтверждают справедливость изложенного в [1, 2, 3, 8]. Полученные практические результаты соотношений парциальных мощностей сигнальных компонент будут полезны при разработке и отладке бортовой аппаратуры формирователя группового сигнала, где критерием правильности схемы группового формирования являлась максимальная степень правдоподобия апостериорной оценки теоретических исследований, заложенных в код программной модели.

Литература

1. Харисов, В. Н. Оптимальное выравнивание суммы навигационных сигналов в ГНСС / В.Н. Харисов, А.А. Поваляев. // Радиотехника. – 2011. – № 7. – С. 65–75.

2. Kharisov, V. Optimal Aligning of the Sums of GNSS Navigation Signals / V. Kharisov, Al. Povalyaev // Inside GNSS. – January, 2012. – P. 56–67.

3. ГЛОНАСС. Принципы построения и функционирования / под ред. А.И. Перова, В.Н. Харисова. – Изд. 4-е, перераб. и доп. – М: Радиотехника, 2010. – 800 с.

4. Ткачев, А. Б. Цифровое формирование навигационных сигналов системы ГЛОНАСС / А.Б. Ткачев, Д.А. Астахов // Информация и Космос. – 2017. – № 1. – С. 81–83.

5. Пат. № 2660126 Российская Федерация, МПК G01S 19/01, H04B 7/005. Способ формирования группового навигационного сигнала ГЛОНАСС / Д.А. Астахов, М.Ф. Кудряшов, А.Б. Ткачев ; патентообладатель АО «Российские космические системы»; № 2017133048 ; заял. 22.09.2017; опубл. 05.07.2018, Бюл. № 19 – 10 с.

6. Пат. № 2646315 Российская Федерация, МПК H03C 1/00, G01S 19/00. Способ формирования сигнала спутниковой навигационной системы / Д.А. Астахов, А.Б. Ткачев ; патентообладатель АО «Российские космические системы»; №2016144498; заявл. 14.11.2016; опубл. 02.03.2018 – Бюл. № 7. – 8 с.

7. Свидетельство о государственной регистрации программы ЭВМ № 2018618279 Российская Федерация. Программа формирования группового навигационного сигнала ГЛОНАСС с воспроизведением в аналоговой форме на аппаратуре формирователя сигнала произвольной формы / О.А. Гончаров [и др.] ; правообладатель АО «Российские космические системы»; № 2018616063; заявл. 05.06.2018; опубл. 11.07.2018.

8. Бирюков, А. А. Вариант технической реализации устройства нелинейного уплотнения частотных и кодовых навигационных сигналов ГЛОНАСС / А.А. Бирюков // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы. – 2018. – Т. 5, Вып. 2. – С. 11–19.