

Информационные характеристики элементов рабочего созвездия СРНС ГЛОНАСС и сети псевдоспутников в Арктическом регионе России

© В. И. Бабуров, Н. В. Васильева, Н. В. Иванцевич

АО «ВНИИРА», НТЦ «Навигатор», г. Санкт-Петербург, Россия

Анализируются состав и информационные характеристики рабочих созвездий спутниковой радионавигационной системы (СРНС) ГЛОНАСС, дополненной псевдоспутниками, в Арктическом регионе России. Исследования выполнены методом имитационного математического моделирования. Установлена значительная избыточность рабочих созвездий при номинальном значении допустимого угла возвышения спутников. Исследована возможность использования этого фактора для формирования управляемых рабочих созвездий в авиационном бортовом навигационно-посадочном комплексе.

Ключевые слова: радионавигация, посадка, моделирование, точность местоопределений, многолучевость.

Введение

При интенсивном освоении Арктического региона России [1] ожидается существенное увеличение интенсивности полетов различных типов летательных аппаратов (ЛА) в регионе и использование для их посадки необорудованных традиционными посадочными средствами площадок и ледовых аэродромов. Это определяет актуальность задачи навигационного обеспечения ЛА на всех этапах полета в Арктике, включая и режим посадки. Перспективным координатно-временным обеспечением является спутниковая радионавигация. Отечественная система ГЛОНАСС создаёт навигационно-временное поле, удовлетворяющее требованиям авиации для навигации в стандартных условиях, а в сочетании с локальными функциональными дополнениями — и требованиям для посадки самолётов по I и II категориям Международной организации гражданской авиации.

Однако в нештатных ситуациях, обусловленных затенениями спутников при кренах/тангажах ЛА или при наличии помех приему сигналов с какого-либо направления, при работе в условиях влияния переотражений радиосигналов от подстилающей поверхности и в других ситуациях может возникнуть необходимость в формировании так называемого «управляемого рабочего созвездия» спутников. Такое созвездие отличается от стандартного тем, что из последнего по определенной программе на потребителе (П) исключаются отдельные спутники или спутники, расположенные относительно П в заданном диапазоне углов возвышения. При этом достигается эффект ослабления влияния помех на результаты координатно-временных измерений.

Реализуемость таких управляемых рабочих созвездий (РС) зависит от информационной избыточности навигационного поля СРНС и от допустимых углов возвышения спутников в РС, формируемом в навигационной аппаратуре потребителя (НАП). Чем больше информационная избыточность навигационного поля, тем больше возможностей для создания управляемых РС в НАП. Известным способом увеличения информационной избыточности навигационного поля и, следовательно, РС в НАП, является использование дополнительных локальных радионавигационных точек (РНТ), например, псевдоспутников (ПС).

В статье анализируются информационные и структурные характеристики рабочих созвездий СРНС ГЛОНАСС и сети ПС в Арктическом регионе России.

Информационные характеристики

Информационные свойства навигационного поля СРНС ГЛОНАСС + n ПС, $n \in [0; 1; 2]$, будем характеризовать изменением энтропии k и количеством информации I , приобретаемым при переходе от номинального рабочего созвездия к управляемому путем исключения некоторых спутников из состава РС и добавления сети ПС.

Используя определение информации по Шеннону, можно представить изменение энтропии и количество информации в виде: $k=V_0/V_1$, $I = \log_2(V_0/V_1)$. В этих формулах V_0 и V_1 характеризуют размеры областей неопределенности оцениваемых параметров до и после трансформации рабочего созвездия.

Можно показать, что при достаточно общих предположениях о равной точности измерения радионавигационных параметров по всем элементам РС отношение характеристик неопределенности V_0 и V_1 равно отношению соответствующих геометрических факторов (ГФ) Γ_0 и Γ_1 . Тогда $k = \Gamma_0 / \Gamma_1$, $I = \log_2(k)$.

Численное моделирование

Исследование структурных и информационных характеристик рабочих созвездий СРНС ГЛОНАСС и сети псевдоспутников в Арктике проведено методом имитационного математического моделирования. Основными рассчитываемыми характеристиками рабочих созвездий являются число «видимых» с потребителя спутников ГЛОНАСС n_v и геометрические факторы, соответствующие определенному навигационному параметру — широте, долготе, высоте, времени, положению в горизонтальной плоскости и в пространстве. По этим данным можно определить, в частности, изменение энтропии РС, количество информации, избыточность рабочего созвездия, оценить возможность борьбы с помехой многолучевости, искусственными помехами и другие показатели.

Для системы ГЛОНАСС моделировались ситуации «СРНС – ЛА». Каждой ситуации соответствовали случайное равновероятное расположение ЛА в регионе и случайный момент времени проведения навигационных определений, равновероятный из интервала повторяемости конфигурации спутников ГЛОНАСС. Алгоритмы и блок-схема моделирования ситуаций «СРНС – ЛА» подробно рассмотрены в монографии [2]. Арктический регион при исследованиях был ограничен меридианами 30° в. д. и 170° з. д. севернее полярного круга (широта $\varphi \geq 66.5622^\circ$ с. ш.). Минимально допустимые углы возвышения навигационного искусственного спутника Земли (НИСЗ) изменялись от номинального значения α_0 , равного 5° , до 20° в усеченных рабочих созвездиях. При исключении из РС спутников с углами возвышения, большими 20° , происходило существенное уменьшение информативности РС.

Увеличение избыточности навигационного поля возможно за счет объединения навигационных полей ГЛОНАСС и локальных радионавигационных точек, например, псевдоспутников [2]. Моделировались ситуации «СРНС – ЛА – ПС₁ – ПС₂». Летательный аппарат и два псевдоспутника ПС₁ и ПС₂ располагались в точках с априорно заданными координатами. Моменты времени навигационных определений выбирались равновероятно из интервала повторяемости конфигурации сети спутников ГЛОНАСС. Объём выборки n составлял 100000 точек. Моделируемые ситуации соответствовали режиму посадки ЛА на аэродром с координатами $\varphi = 81.5^\circ$ с. ш., $\lambda = 59.2^\circ$ в. д. (о. Рудольфа). Полагалось, что взлетно-посадочная полоса (ВПП) ориентирована по направлению север – юг, заход на посадку производился с северного направления.

ЛА располагался последовательно в каждой из двух контролируемых точек посадочной глиссады соответственно на высотах $h_1 = 60$ м и $h_2 = 15$ м. Первая точка, называемая «точкой ухода на второй круг», удалена от торца ВПП по горизонтали на 600 м, а вторая находится над торцом ВПП. Псевдоспутники размещались под контролируруемыми точками глиссады. Конфигурация сети ПС выбрана из условий минимизации геометрических факторов VDOP и PDOP в первой и второй точках глиссады.

Результаты моделирования

В табл. 1 даны эмпирические вероятности $p(n_s)$ количественного состава рабочих созвездий НИСЗ ГЛОНАСС при различных минимально допустимых углах возвышения навигационных спутников α_0 . Курсивом выделены наиболее вероятные значения.

Таблица 1

Состав рабочих созвездий НИСЗ ГЛОНАСС в Арктике

α_0	$p(n_s = 5)$	$p(n_s = 6)$	$p(n_s = 7)$	$p(n_s = 8)$	$p(n_s = 9)$	$p(n_s = 10)$	$p(n_s = 11)$
5°	0	0	0	0.1001	<i>0.7675</i>	0.1237	0.0086
10°	0	0.0090	0.1040	<i>0.4757</i>	0.4114	0	0
15°	0	0.1201	0.3144	<i>0.4696</i>	0.0959	0	0
20°	0.0303	0.3709	<i>0.3822</i>	0.2136	0.0029	0	0

Таблица 2

Статистики геометрических факторов ГЛОНАСС в Арктике

α_0	ГФ	Среднее (ГФ)	СКО (ГФ)	МАХ (ГФ)
5°	HDOP	0.900	0.064	1.188
	VDOP	1.516	0.201	2.000
	PDOP	1.764	0.196	2.253
10°	HDOP	0.986	0.120	1.931
	VDOP	1.815	0.410	5.260
	PDOP	2.068	0.413	5.513
15°	HDOP	1.111	0.224	2.348
	VDOP	2.319	0.843	5.261
	PDOP	2.578	0.854	5.605
20°	HDOP	1.284	0.290	2.530
	VDOP	2.973	1.083	6.752
	PDOP	3.247	1.097	7.133

В табл. 2 приведены характеристики точности определения горизонтальных координат, высоты и положения, определяемые значениями соответствующих геометрических факторов HDOP, VDOP и PDOP, при тех же значениях α_0 , что и в табл. 1.

Кратность (n_e) покрытия Арктического региона навигационным полем спутников системы ГЛОНАСС больше, чем в среднем по Земному шару и чем американской системой GPS номинальной конфигурации. Это объясняется разницей баллистических структур этих систем. В зоне радиовидимости летательного аппарата, расположенного в Арктическом регионе России, находится не менее 7 навигационных

Таблица 3

Статистики геометрических факторов ГЛОНАСС + 2 ПС в Арктике
(о. Рудольфа)

α_0	ГФ	Среднее (ГФ)	СКО (ГФ)	Max (ГФ)	P ($n_b < 5$)	P (PDOP > 6)
5°	HDOP	0.799	0.026	0.933	0.00000	0.00000
	VDOP	0.597	0.006	0.607		
	PDOP	0.998	0.024	1.113		
10°	HDOP	0.856	0.068	1.052	0.00000	0.00000
	VDOP	0.602	0.004	0.608		
	PDOP	1.047	0.058	1.215		
15°	HDOP	0.923	0.087	1.168	0.00000	0.00000
	VDOP	0.605	0.003	0.608		
	PDOP	1.105	0.074	1.316		
20°	HDOP	1.001	0.095	1.171	0.00000	0.00000
	VDOP	0.606	0.001	0.608		
	PDOP	1.171	0.082	1.319		
25°	HDOP	1.086	0.074	1.250	0.00000	0.00000
	VDOP	0.607	0.001	0.620		
	PDOP	1.245	0.065	1.391		
30°	HDOP	1.186	0.113	1.752	0.00000	0.00000
	VDOP	0.610	1.006	0.637		
	PDOP	1.334	0.103	1.864		
35°	HDOP	1.324	0.178	1.961	0.00000	0.00000
	VDOP	0.617	0.009	0.645		
	PDOP	1.462	0.166	2.064		
40°	HDOP	1.557	0.361	2.873	0.00000	0.00000
	VDOP	0.626	0.009	0.671		
	PDOP	1.682	0.343	2.943		

Таблица 4

Статистики геометрических факторов ГЛОНАСС в Арктике (о. Рудольфа)

α_0	ГФ	Среднее (ГФ)	СКО (ГФ)	Max (ГФ)	P ($n_b < 5$)	P (PDOP > 6)
5°	HDOP	0.874	0.052	1.058	0.00000	0.00000
	VDOP	1.522	0.165	1.955		
	PDOP	1.756	0.161	2.223		
10°	HDOP	0.951	0.105	1.235	0.00000	0.00000
	VDOP	1.902	0.451	2.873		
	PDOP	2.129	0.451	3.107		
15°	HDOP	1.040	0.131	1.372	0.00000	0.00000
	VDOP	2.335	0.640	5.263		
	PDOP	2.559	0.638	5.404		
20°	HDOP	1.143	0.148	1.677	0.00000	0.00000
	VDOP	2.985	0.999	5.263		
	PDOP	3.204	0.984	5.407		
25°	HDOP	1.298	0.169	2.003	0.00000	0.03797
	VDOP	3.677	0.900	5.692		
	PDOP	3.906	0.885	5.999		
30°	HDOP	1.409	0.207	2.253	0.14587	0.13036
	VDOP	4.396	0.615	5.758		
	PDOP	4.619	0.625	6.000		
35°	HDOP	1.404	0.171	1.842	0.49151	0.16962
	VDOP	4.920	0.491	5.805		
	PDOP	5.118	0.510	6.000		
40°	HDOP	1.557	0.037	1.675	0.86160	0.09668
	VDOP	5.532	0.212	5.816		
	PDOP	5.748	0.205	6.000		

спутников ГЛОНАСС, а наиболее вероятное их число равно 9. Эти данные соответствуют номинальному значению допустимого угла возвышения НИСЗ, равному 5°.

В табл. 3 представлены статистические характеристики геометрических факторов HDOP, VDOP и PDOP при навигационных определениях по интегрированной системе ГЛОНАСС + 2 ПС для летательного аппарата, находящегося в точке ухода на второй круг. Аналогичные данные в случае местоопределений ЛА по НИСЗ ГЛОНАСС приводятся в табл. 4. Исследования показали, что статистические характеристики геометрических факторов для первой и второй рассматриваемых точек глассады практически совпадают. Последние два столбца в табл. 3 и 4 содержат данные о результатах отбраковки рабочих созвездий

НИСЗ по двум показателям: 1 — не собирается рабочее созвездие, $n_6 < 5$; 2 — рабочее созвездие содержит более 4 НИСЗ, но при этом плохой геометрический фактор, то есть PDOP > 6.

Анализ результатов моделирования позволяет установить предельные значения по возможному увеличению параметра α_0 , при котором ещё не будет происходить распад рабочего созвездия навигационных точек системы ГЛОНАСС и интегрированной системы ГЛОНАСС + 2 ПС. В управляемых рабочих созвездиях при навигационных определениях по ГЛОНАСС параметр α_0 должен быть менее 25° , иначе возможны ситуации, когда геометрический фактор превысит допустимое значение. При работе по интегрированной системе ГЛОНАСС + 2 ПС возможно α_0 увеличивать до 40° . Это дает дополнительные возможности при формировании управляемых рабочих созвездий.

Заключение

Таким образом, проведенные исследования показали, что номинальные рабочие созвездия спутников СРНС ГЛОНАСС в Арктическом регионе России обладают значительной информационной избыточностью. Это позволяет в навигационных комплексах ЛА со стандартной НАП реализовывать дополнительные функциональные возможности. Информационная избыточность может быть дополнительно увеличена за счет использования локальных радионавигационных точек. Это улучшит доступность, целостность и надежность информационно-навигационного поля, точность и надежность навигационных определений, повысит возможную категорию посадки по спутниковой системе.

Литература

1. «Основы государственной политики Российской Федерации в Арктике на период до 2020 года и дальнейшую перспективу» (утв. Президентом РФ 18.09.2008 № Пр-1969).
2. *Бабуров В. И., Иванцевич Н. В. и др.* Совместное использование навигационных полей спутниковых радионавигационных систем и сетей псевдоспутников. — СПб.: Изд-во «Агентство «РДК-Принт», 2005. — 264 с.

Information Characteristics of the Elements of the GLONASS Working Constellation and the Network of Pseudolites in the Arctic Region of Russia

V. I. Baburov, N. V. Vasilyeva, N. V. Ivantsevich

The paper analyses the composition and information characteristics of the GLONASS working constellations integrated with pseudolites in the Arctic region of Russia. The research is based on simulation. It has established a considerable redundancy of the working constellations when the angle of admissible satellite elevation is nominal. This factor has been studied in order to investigate the possibility of using it when the controllable working constellations are being formed in the aircraft navigation and landing complex.

Keywords: radio navigation, landing, mathematical simulation, positioning accuracy, multipath.