

**ВЛИЯНИЕ НЕСУЩЕГО ВИНТА И ДРУГИХ ЭЛЕМЕНТОВ
КОНСТРУКЦИИ ВЕРТОЛЕТА НА КАЧЕСТВО
ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ РАЗМЕЩАЕМОЙ
НА НЕМ АППАРАТУРЫ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ СПУТНИКОВЫХ
РАДИОНАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМ**

Н.Е. Зубов^{1,2}

nezubov@bmstu.ru

А.А. Ещенко³

zamnavig@atminst.ru

С.С. Демин⁴

ssdemin@mail.ru

Г.Е. Масленникова⁴

maslennikova@gosniiga.ru

С.В. Иваненко³

work_group777@inbox.ru

¹ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

² ПАО «РКК «Энергия» им. С.П. Королёва»,

г. Королёв, Московская обл., Российская Федерация

³ НИИ Аэронавигации — филиал ФГУП «ГосНИИ ГА»,

Москва, Российская Федерация

⁴ ФГУП «ГосНИИ ГА», Москва, Российская Федерация

Аннотация

Проведен анализ влияния дифракции сигнала на несущем винте вертолета, отражений сигнала от элементов конструкции и экранирования лопастями несущего винта вертолета приемной антенны на отношение сигнал/шум в полосе коррелятора аппаратуры потребителей спутниковых радионавигационных систем типа ГЛОНАСС и GPS, на точность навигационных определений, а также на вероятность ошибок при передаче служебной информации от навигационных космических аппаратов на борт вертолета. Показано, что влияние вертолета на качество функционирования размещаемой на нем аппаратуры потребителей проявляется в дифракционных волнах на кромках и экранировании антенны. Наличие дифракционных волн и уменьшение уровня первичного сигнала в результате затенения антенны аппаратуры потребителей приводит к увеличению на один–два порядка вероятности ошибки на бит в канале передачи служебной информации. Влияние на точность навигационных определений незначительно

Ключевые слова

Навигационные определения, спутниковая радионавигационная система, вертолет, несущий винт, дифракция, затенение антенны, навигационные определения, точность местоопределения, вероятность ошибки на бит

Поступила 21.01.2019

© Автор(ы), 2019

Введение и постановка задачи исследования. Многие специальные работы, требующие высокой точности местоопределения, в частности, топогеодезические и поисково-спасательные, доставка грузов в труднодоступные районы, мониторинг газо- и нефтепроводов, ледовая разведка, выполняются с использованием вертолетов.

Наиболее высокоточным средством навигационных определений воздушных судов (ВС), в том числе вертолетов, в настоящее время являются спутниковые радионавигационные системы (СРНС) типа ГЛОНАСС и GPS [1, 2]. Внедрение СРНС в авиации и космонавтике в настоящее время распространенное явление [3–8]. Эксплуатация аппаратуры потребителей (АП) СРНС, размещаемой на вертолете, имеет определенные особенности, связанные с влиянием несущего винта (НВ) и других элементов конструкции вертолета на условия распространения радиосигнала от навигационных космических аппаратов (НКА), используемого при навигационных определениях вертолета рабочего созвездия СРНС к АП. В литературе, посвященной проектированию и эксплуатации современной АП СРНС, эти вопросы не нашли достаточного освещения. Соответственно указанное ранее направление исследований и рассматривается в настоящей работе.

Результаты исследований. Распространение сигналов от НКА к АП имеет многолучевой характер [9]. При этом основные пути распространения сигналов СРНС от НКА к антенне (А) АП показаны на рис. 1. Они следующие: НКА–ХБ (хвостовая балка)–НВ–А (рис. 1, а); НКА–НВ–ХБ–НВ–А (рис. 1, б); НКА–кабина вертолета–А (рис. 1, в); НКА–кабина вертолета–НВ–А (рис. 1, г). Отметим, что дифракцию электромагнитных волн на ХБ можно не учитывать, поскольку ее радиус кривизны, примерно равный 2 м, существенно превышает максимальную длину волны сигналов СРНС, равную 20 см [9].

Уровень сигнала, образованного в результате дифракции электромагнитных волн на элементах конструкции вертолета, можно определить, используя геометрическую теорию дифракции [10, 11]. В соответствии с этой теорией, сигналы СРНС, распространяясь прямолинейно, после отражения от ХБ попадают на кромку лопасти НВ, образуя косинусы дифракционных лучей в каждой точке кромки. Поскольку под лопастями НВ на уровне ХБ, находящимися в дальней зоне дифракции, дифракционная волна может считаться плоской, ее уровень практически полностью определяется первичной дифракцией на кромке лопасти НВ.

Таким образом, уровень дифракционной волны на каждой кромке лопасти НВ определяется выражением

$$U_{\text{диф}} = \frac{-U_0 \exp \left[i \left(KS_{\text{диф}} + \frac{\pi}{4} \right) \right]}{2 \sqrt{2 \pi KS_{\text{диф}} \sin \omega}} \frac{1}{\cos(\varphi - \varphi_0/2)}. \quad (1)$$

Здесь обозначено: $K = 2\pi / \lambda$ — волновое число, λ — длина волны сигналов СРНС; U_0 — амплитуда первичной электромагнитной волны от НКА; $S_{\text{диф}}$ — длина вдоль луча распространения дифракционной волны (эйконол); ω , φ и φ_0 — угол раствора конуса дифракционных лучей, углы между нормалью к кромке лопасти НВ и проекциями дифракционного и первичного лучей на вертикальную секущую плоскость.

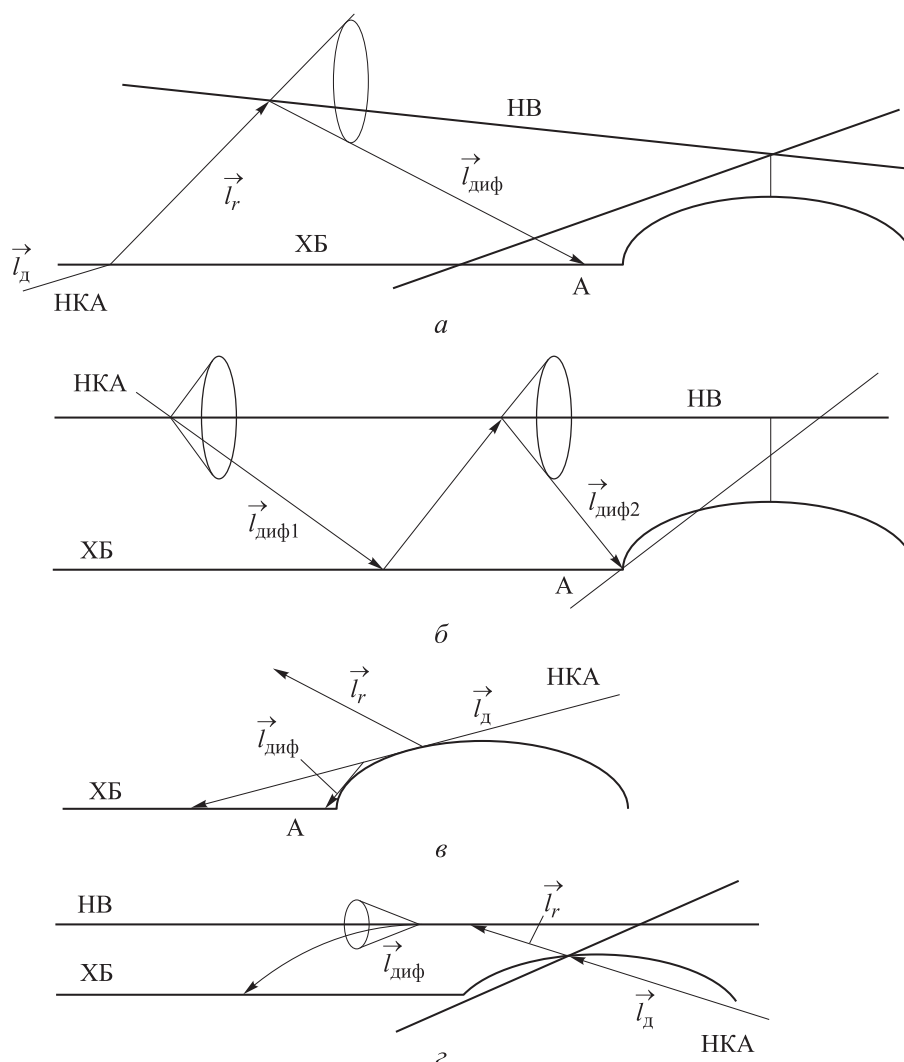


Рис. 1. Основные пути распространения сигналов СРНС от НКА к антенне АП СРНС

Расчеты (1) амплитуды результирующего дифракционного сигнала для пути НКА–ХБ–НВ–А, проведенные для двух кромок лопасти НВ и однократной дифракции на них, показали, что она не превышает 20 дБ по отношению к амплитуде первичного сигнала от НКА. Аналогичные расчеты, проведенные для пути НКА–НВ–ХБ–НВ–А, в которых учитывались две кромки лопасти НВ и две дифракции на них, показали, что амплитуда результирующего дифракционного сигнала не превышает 25 дБ по отношению к амплитуде первичного сигнала от НКА. Отметим, что в обоих случаях амплитуда дифракционного сигнала находится на уровне шума.

Рассмотрим путь НКА–кабина вертолета–А. Дифракция на этом пути не возникает, потому что радиус кривизны кабины много больше длины волны сигналов СРНС, причем первичный сигнал от НКА, распространяясь, в соответствии с теорией геометрической оптики, прямолинейно, при курсе вертолета, близком к направлению на НКА, экранируется кабиной. Телесный угол, в пределах которого происходит затенение антенны АП, зависит от расстояния от оси НВ вертолета до антенны, которое, например для вертолета МИ-8, составляет ~ 2 м. В данном случае этот угол относительно невелик и равен $\sim 10^\circ$.

Единственным путем распространения сигнала от НКА к антенне АП, на котором имеет место дифракция с заметной амплитудой дифракционной волны порядка 5 дБ по отношению к амплитуде первичного сигнала от НКА, это путь НКА–кабина вертолета–НВ–А. Однако это имеет место лишь при курсе вертолета, близком к направлению на НКА, когда направление распространения дифракционной волны, возникающей на кромке НВ, составляет малый угол с направлением распространения отраженной от кабины волны.

Таким образом, можно сделать вывод, что многолучевое распространение сигналов СРНС по указанным путям приводит к возникновению дифракционных волн со сравнительно небольшой амплитудой, откуда следует, что эта многолучевость несущественно влияет на качество функционирования АП СРНС.

Оценим влияние на качество функционирования АП СРНС экранирования антенны АП несущим винтом вертолета, называемого «вертолетным эффектом» [12]. Точность навигационных определений и вероятность ошибок при передаче служебной информации от НКА на борт вертолета определяется отношением сигнал/шум на входе АП СРНС. Поскольку передаваемая служебная информация содержит данные об эфемеридах НКА и данные о нарушениях в работе НКА, то ошибки при ее передаче, вызванные

влиянием НВ, могут приводить к ошибкам типа «промах» при навигационных определениях и даже к нарушению работы АП.

В СРНС типа ГЛОНАСС и GPS используется сигнал с бинарной фазовой манипуляцией (ФМ-2), что обеспечивает максимальную помехоустойчивость аппаратуры передачи данных.

Запишем сигнал на входе АП СРНС, в котором учитывается влияние НВ, следующим образом:

$$S(t) = X(t) S_0(t) + \xi(t) + \sum_{i=1}^N S_{i\text{диф}}(t), \quad (2)$$

где $X(t)$ — функция экранирования, зависящая от формы и частоты вращения НВ, описываемая выражением

$$X(t) = \begin{cases} 1 & \text{— в области света,} \\ 0 & \text{— в области тени;} \end{cases}$$

$\xi(t)$ — флуктуационная радиопомеха, которая полагается нормальным белым шумом; $S_0(t)$ — первичный сигнал от НКА; $S_{i\text{диф}}(t)$ — дифракционный сигнал от кромки НВ.

В развернутом виде выражение (2) может быть представлено как

$$S(t) = X(t) A_0 \cos \omega_0 t + A(t) \cos [\omega_0 t + \varphi_\xi(t)] + \sum_{i=0}^N A_{i\text{диф}}(t) \cos [\omega_0 t + \psi_i(t)]. \quad (3)$$

Здесь A_0 — амплитуда первичного сигнала от НКА; $A(t)$ и $\varphi_\xi(t)$ — огибающая и фаза флуктуационной помехи при нормальном по закону Релея и равномерном (на интервале) $[-\pi, \pi]$ распределении; $A_{i\text{диф}}(t)$ и $\psi(t)$ — амплитуда дифракционного сигнала и сдвиг его фазы относительно фазы первичного сигнала.

Фаза смеси гармонического сигнала $S_0(t)$ и нормальной флуктуационной радиопомехи $\xi(t)$ при отсутствии влияния НВ, т. е. при $x(t) = 1$ и $N = 0$, описывается плотностью вероятности [8]:

$$P(\theta / G) = \frac{1}{2\pi} e^{-a^2/2} \left[1 + \sqrt{2\pi} a (\cos \theta) \Phi(a \cos \theta) e^{a^2 \cos^2 \theta/2} \right]. \quad (4)$$

Здесь обозначено: $a = A_0 / \sigma_\xi$ — отношение амплитуды сигнала к среднеквадратическому отклонению флуктуационной помехи; $\Phi(\cdot)$ — интеграл вероятности. При этом начальная фаза сигнала G принята равной нулю. При большом отношении сигнал/флуктуационная помеха ($a > 3$) распределение (4) переходит в нормальное:

$$P(\theta / G) = (2\pi)^{-1/2} a \exp(-a^2 \theta^2 / 2). \quad (5)$$

При сложении первичного сигнала от НКА с дифракционными сигналами, возникающими на кромках лопастей НВ, имеет место интерференция последних с первичным сигналом, приводящая к возникновению сдвига фаз между указанными сигналами, который описывается выражением

$$\psi(t) = \Delta\omega_d(t)t + \theta_\Delta(t). \quad (6)$$

Здесь $\Delta\omega_d(t)$ и $\theta_\Delta(t)$ — вызванный перемещением лопастей НВ относительно НКА и антенны АП СРНС доплеровский сдвиг частоты дифракционных сигналов и фазовый сдвиг дифракционных сигналов относительно первичного сигнала, обусловленный увеличением проходимого ими пути. При этом, как показал анализ, ширина доплеровского сдвига составляет не более 100 Гц.

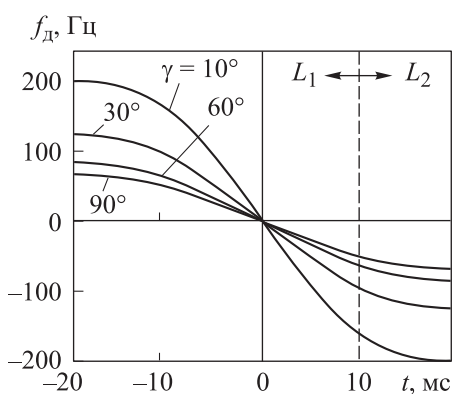


Рис. 2. Зависимость угла места НКА доплеровского сдвига частоты дифракционных сигналов от времени

Результаты расчетов зависимости от времени и угла места НКА относительно вертолета доплеровского сдвига частоты дифракционных сигналов приведены на рис. 2. Видно, что увеличение угла места НКА, например, в условиях ограниченной радиовидимости из-за затенения горными образованиями, приводит к уменьшению доплеровского сдвига частоты, что объясняется приближением существенной для дифракции области к оси НВ.

На рис. 2 границы между «светом» и «тенью» первичного сигнала, образованные первой и второй кромками

лопасти НВ, обозначены соответственно L_1 и L_2 .

Результаты расчетов зависимости от времени и угла места НКА относительно вертолета амплитуды дифракционных сигналов и сдвига их фазы относительно фазы первичного сигнала от НКА приведены на рис. 3 и 4.

Проведенные расчеты показывают, что при углах места НКА относительно вертолета γ , равных 10° , 50° и 90° , на протяжении соответственно 4, 9 и 10 мс имеет место полное экранирование несущим винтом антенны АП СРНС, т. е. первичный сигнал от НКА отсутствует и характеристики принимаемого сигнала определяются дифракционными волнами.

При этом, как видно на рис. 3, максимальное значение относительной величины амплитуды дифракционных сигналов для указанных углов места НКА относительно вертолета составляет соответственно 0,28; 0,2 и 0,12.

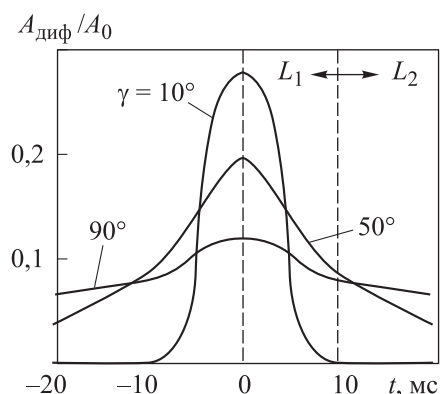


Рис. 3. Временная зависимость места НКА и угла места НКА амплитуды дифракционных сигналов

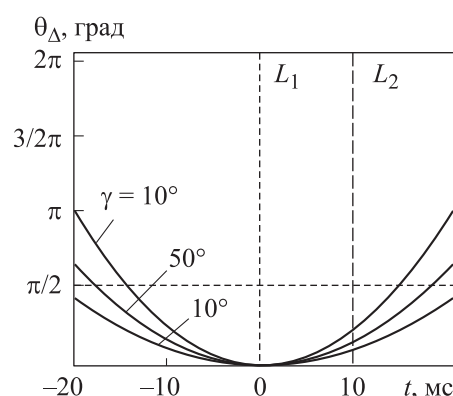


Рис. 4. Зависимость от времени и угла сдвига фазы дифракционных сигналов относительно фазы первичного сигнала

Из рис. 4 следует, что при увеличении угла места НКА относительно вертолета имеет место увеличение сдвига фазы дифракционных сигналов относительно фазы первичного сигнала от НКА. Это можно объяснить уменьшением расстояния от существенной для дифракции области до точки приема сигнала, что, в свою очередь, приводит к увеличению разности длин луча первичной волны от НКА и лучей дифракционных волн, определяющей величину сдвига фазы дифракционных сигналов относительно фазы первичного сигнала.

С учетом того, что в СРНС типа ГЛОНАСС и GPS используется фазоманипулированный сигнал, возникающий под влиянием НВ, дополнительный фазовый сдвиг принятого сигнала может приводить к ухудшению качества функционирования АП СРНС.

На рис. 4 видно, что при больших углах места НКА относительно вертолета фазовый сдвиг дифракционных сигналов относительно первичного сигнала от НКА (вдали от области отсутствия последнего) может достигать значений, превышающих $\pi/2$. В принципе, это может приводить к нарушению информации, передаваемой с использованием фазоманипулированного сигнала, что заключается в возникновении так называемых «перескоков» фазы в другие фазовые циклы. Однако поскольку в этой области амплитуды дифракционных сигналов малы — более чем на порядок меньше амплитуды первичного сигнала от НКА, то влияние НВ на качество функционирования АП СРНС должно быть малосущественным вследствие малого относительного уровня дифракционных сигналов (см. рис. 3).

В области отсутствия первичного сигнала от НКА, в которой на вход антенны АП поступают только дифракционные сигналы, перескоки фазы

вследствие влияния НВ отсутствуют, так как в этой области (см. рис. 4) фазовый сдвиг дифракционных сигналов относительно первичного сигнала от НКА мал и не превышает $\pi/4$.

Точность навигационных определений вертолета с использованием АП СРНС определяется отношением сигнал/помеха в полосе коррелятора, входящего в состав АП. При этом влияние НВ на нее может быть оценено по степени уменьшения этого отношения под влиянием возникающих на краях НВ дифракционных сигналов. Как видно на рис. 3, уровень этих сигналов максимален при малых углах места НКА относительно вертолета. Так, при угле 10° отношение максимального значения амплитуды дифракционных сигналов к амплитуде первичного сигнала от НКА равно 0,28. С увеличением угла места до 90° оно уменьшается до 0,12.

С учетом относительной малости уровня дифракционных сигналов даже при наиболее неблагоприятных условиях приема сигналов СРНС — малых углах места НКА относительно вертолета, можно полагать, что уменьшение отношения сигнал/помеха, а следовательно, и снижение точности навигационных определений, вызванное влиянием НВ, будет незначительным.

Представляет интерес оценить также влияние НВ на вероятность ошибок при передаче на борт вертолета служебной информации от НКА, осуществляемой путем дополнительной фазовой манипуляции сигналов СРНС. Актуальность такого рассмотрения обусловлена тем, что, как отмечалось ранее, ошибки при передаче этой информации могут приводить к появлению аномально больших ошибок типа «промах» при навигационных определениях и даже к нарушению работы АП СРНС.

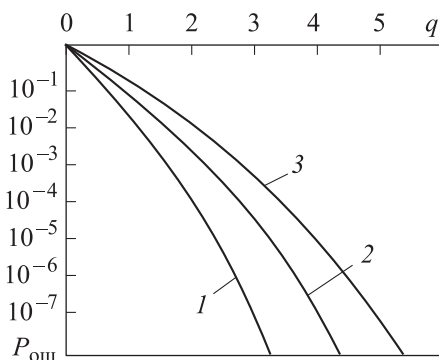


Рис. 5. Зависимость вероятности ошибки от отношения сигнал/помеха:
1 — без учета НВ; 2 и 3 — с учетом НВ при $\tau_3 = 10$ и 20 мс

навигационных определениях и даже к нарушению работы АП СРНС.

Методами математического моделирования был проведен анализ зависимости вероятности ошибки на бит $P_{ош}$ от отношения сигнал/помеха q в полосе коррелятора АП СРНС ГЛОНАСС без учета и с учетом влияния НВ. Причем анализ влияния НВ выполнялся для двух значений времени экранирования антенны АП лопастями НВ τ_3 — 10 и 20 мс, которое может разным у вертолетов различных типов (рис. 5).

Из рис. 5 следует, что при отношении сигнал/помеха $q = 2,5$ и отсутствии влияния НВ полагается приемлемой для нормальной работы АП СРНС вероятность ошибки на бит $P_{\text{ош}} = 10^{-5}$. За счет влияния НВ с $\tau_3 = 10$ мс вероятность ошибки возрастает до $5 \cdot 10^{-4}$; увеличение τ_3 до 20 мс приводит к увеличению вероятности ошибки до $5 \cdot 10^{-3}$.

Видно, что влияние НВ на помехоустойчивость канала передачи на борту вертолета служебной информации от НКА, содержащейся в сигналах СРНС, достаточно существенно.

Помехоустойчивость канала можно улучшить путем применения методов помехоустойчивого кодирования информации.

Заключение. В результате проведенного исследования выявлено, что влияние несущего винта и других элементов конструкции вертолета на качество функционирования размещаемой на нем аппаратуры потребителей спутниковых радионавигационных систем типа ГЛОНАСС и GPS проявляется в появлении дифракционных волн на кромках и экранировании антенны. Наличие дифракционных волн и уменьшение уровня первичного сигнала вследствие затенения антенны АП приводит к увеличению на один-два порядка вероятности ошибки на бит в канале передачи служебной информации. Влияние на точность навигационных определений незначительно.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Соловьев Ю.А. Системы спутниковой навигации. М., Эко-Трендз, 2000.
- [2] Перов А.И., Харисов В.Н., ред. ГЛОНАСС. Принципы построения и функционирования. М., Радиотехника, 2005.
- [3] Ерохин В.В. Управление траекторией летательного аппарата при полете по заданному маршруту на основе глобальной навигационной спутниковой системы. *Известия вузов. Авиационная техника*, 2018, № 3, с. 49–56.
- [4] Розенберг И.Н., Соколов С.В., Баяндурова А.А. Повышение точности позиционирования летательного аппарата при его движении по заданной линии траектории. *Известия вузов. Авиационная техника*, 2018, № 2, с. 64–70.
- [5] Анцев Г.В., Лысенко Л.Н., Петров В.А. Повышение точности определения параметров орбит на основе применения операторов совмещения витковых оценок по результатам малоинтервальной обработки данных ГЛОНАСС. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение*, 2016, № 5, с. 99–110.
DOI: 10.18698/0236-3933-2016-5-99-110
- [6] Микрин Е.А., Михайлов М.В. Навигация космических аппаратов по измерениям от глобальных спутниковых навигационных систем. М., Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2017.

- [7] Микрин Е.А., Михайлов М.В. Ориентация, выведение, сближение и спуск космических аппаратов по измерениям от глобальных спутниковых навигационных систем. М., Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2017.
- [8] Bamford W., Winternitz L., Hay C. Autonomous GPS positioning at high earth orbits. *gpsworld.com: веб-сайт*.
URL: <https://www.gpsworld.com/transportationaviationinnovation-spacecraft-navigator-1053> (дата обращения: 18.02.2019).
- [9] Боровиков В.А., Кинбер Б.Е. Геометрическая теория дифракции. М., Связь, 1978.
- [10] Долуханов М.П. Распространение радиоволн. М., Связь, 1972.
- [11] Козлов А.В., ред. Проблемы совершенствования технического обслуживания авиационной техники инженерно-авиационного обеспечения полетов. М., МИИГА, 1988.
- [12] Левин Б.Р. Теоретические основы статистической радиотехники. Кн. 1. М., Советское радио, 1966.

Зубов Николай Евгеньевич — д-р техн. наук, профессор кафедры «Системы автоматического управления» МГТУ им. Н.Э. Баумана, декан факультета РКТ МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1); профессор аспирантуры ПАО «РКК «Энергия» им. С.П. Королёва» (Российская Федерация, 141070, Московская обл., г. Королёв, ул. Ленина, д. 4А).

Ещенко Александр Александрович — заместитель директора по аэронавигационному обслуживанию НИИ Аэронавигации — филиала ФГУП «ГосНИИ ГА» (Российская Федерация, 123182, Москва, Волоколамское шоссе, д. 26).

Демин Сергей Сергеевич — д-р экон. наук, доцент, заместитель генерального директора ФГУП «ГосНИИ ГА» (Российская Федерация, 125438, Москва, Михалковская ул., д. 67, корп. 1).

Масленникова Галина Евгеньевна — д-р техн. наук, начальник отдела ФГУП «ГосНИИ ГА» (Российская Федерация, 125438, Москва, Михалковская ул., д. 67, корп. 1).

Иваненко Сергей Витальевич — инженер, ведущий специалист НИИ Аэронавигации — филиала ФГУП «ГосНИИ ГА» (Российская Федерация, 123182, Москва, Волоколамское шоссе, д. 26).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Зубов Н.Е., Ещенко А.А., Демин С.С. и др. Влияние несущего винта и других элементов конструкции вертолета на качество функционирования размещаемой на нем аппаратуры потребителей спутниковых радионавигационных систем. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение*, 2019, № 4, с. 71–83.
DOI: 10.18698/0236-3933-2019-4-71-83

EFFECT OF THE MAIN ROTOR AND OTHER HELICOPTER DESIGN FEATURES ON THE PERFORMANCE OF SATELLITE RADIONAVIGATION SYSTEM USER EQUIPMENT MOUNTED ON THE CRAFT

N.E. Zubov^{1,2}

nezubov@bmstu.ru

A.A. Eshchenko³

zamnavig@atminst.ru

S.S. Demin⁴

ssdemin@mail.ru

G.E. Maslennikova⁴

maslennikova@gosniiga.ru

S.V. Ivanenko³

work_group777@inbox.ru

¹ Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

² S.P. Korolev Rocket and Space Corporation Energia, Korolev, Moscow Region, Russian Federation

³ Branch “Research and Development Institute of Air Navigation” of the State Scientific Research Institute of Civil Aviation, Moscow, Russian Federation

⁴ State Scientific Research Institute of Civil Aviation, Moscow, Russian Federation

Abstract

We analysed how signal diffraction caused by the main rotor, signal reflection from helicopter components, and receiver antenna shielding by the main rotor blades affect the signal-to-noise ratio in the correlator band of satellite radionavigation system user equipment for GLONASS and GPS, its navigation precision and error probability when transmitting overhead information from navigation spacecraft to the helicopter. The investigation showed that the effect of helicopter design on the performance of user equipment mounted on it manifests as antenna shielding and diffraction waves appearing at the edges. The presence of diffraction waves and reduction in the original signal amplitude as a result of shielding the user equipment antenna leads to the Bit Error Rate in the overhead information transmission channel increasing by one or two orders of magnitude. Effect on navigation accuracy is negligible

Keywords

Navigation, satellite radionavigation system, helicopter, main rotor, diffraction, antenna shielding, navigation, navigation accuracy, bit error rate

Received 21.01.2019

© Author(s), 2019

REFERENCES

- [1] Solov'yev Yu.A. Sistemy sputnikovoy navigatsii [Satellite navigation systems]. Moscow, Eko-Trendz Publ., 2000.
- [2] Perov A.I., Kharisov V.N., ed. GLONASS. Printsipy postroeniya i funktsionirovaniya [GLONASS. Principles of construction and functioning]. Moscow, Radiotekhnika Publ., 2005.

- [3] Erokhin V.V. Aircraft trajectory control at the motion on the predetermined route based on the global navigation satellite system. *Russ. Aeronaut.*, 2018, vol. 61, no. 3, pp. 371–378. DOI: 10.3103/S106879981803008X
- [4] Rozenberg I.N., Sokolov S.V., Bayandurova A.A. Improving the positional accuracy of the airborne vehicle during its motion along the predetermined path. *Russ. Aeronaut.*, 2018, vol. 61, no. 2, pp. 212–219. DOI: 10.3103/S1068799818020095
- [5] Antsev G.V., Lysenko L.N., Petrov V.A. Increased accuracy in determining the orbital parameters based on convolution operators application as a result of small interval GLONASS data processing. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Priborostr.* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Instrum. Eng.], 2016, no. 5, pp. 99–110 (in Russ.). DOI: 10.18698/0236-3933-2016-5-99-110
- [6] Mikrin E.A., Mikhaylov M.V. Navigatsiya kosmicheskikh apparatov po izmereniyam ot global'nykh sputnikovykh navigatsionnykh system [Spacecraft navigation by measurements from global satellite navigation systems]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2017.
- [7] Mikrin E.A., Mikhaylov M.V. Orientatsiya, vyvedenie, sblizhenie i spusk kosmicheskikh apparatov po izmereniyam ot global'nykh sputnikovykh navigatsionnykh system [Orientation, launch, rendezvous and disorbit of spacecraft using measurements from global satellite navigation systems]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2017.
- [8] Bamford W., Winternitz L., Hay C. Autonomous GPS positioning at high earth orbits. *gpsworld.com: website*. Available at: <https://www.gpsworld.com/transportationaviationinnovation-spacecraft-navigator-1053> (accessed: 18.02.2019).
- [9] Borovikov V.A., Kinber B.E. Geometricheskaya teoriya difraktsii [Geometric diffraction theory]. Moscow, Svyaz' Publ., 1978.
- [10] Dolukhanov M.P. Rasprostranenie radiovoln [Radio waves distribution]. Moscow, Svyaz' Publ., 1972.
- [11] Kozlov A.V., red. Problemy sovershenstvovaniya tekhnicheskogo obsluzhivaniya aviatsionnoy tekhniki inzhenerno-aviatsionnogo obespecheniya poletov [Problems of refining maintenance service of aviation techniques for engineering-aviation maintenance of flights]. Moscow, MIIGA Publ., 1988.
- [12] Levin B.R. Teoreticheskie osnovy statisticheskoy radiotekhniki. Kn. 1 [Theoretical fundamentals of statistic radio engineering. Vol. 1]. Moscow, Sovetskoe radio Publ., 1966.

Zubov N.E. — Dr. Sc. (Eng.), Professor, Department of Automated Control Systems, Bauman Moscow State Technical University; Dean, Aerospace Technology Faculty, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation); Professor, Postgraduate Studies Department, S.P. Korolev Rocket and Space Corporation Energia (Lenina ul. 4A, Korolev, Moscow Region, 141070 Russian Federation).

Eshchenko A.A. — Deputy Director in charge of air navigation service, Branch “Research and Development Institute of Air Navigation” of the State Scientific Research Institute of Civil Aviation (Volokolamskoe shosse 26, Moscow, 123182 Russian Federation).

Demin S.S. — Dr. Sc. (Econ.), Assoc. Professor, Deputy Director General, State Scientific Research Institute of Civil Aviation (Mikhalkovskaya ul. 67, korpus 1, Moscow, 125438 Russian Federation).

Maslennikova G.E. — Dr. Sc. (Eng.), Head of Department, State Scientific Research Institute of Civil Aviation (Mikhalkovskaya ul. 67, korpus 1, Moscow, 125438 Russian Federation).

Ivanenko S.V. — Engineer, Leading Specialist, Branch “Research and Development Institute of Air Navigation” of the State Scientific Research Institute of Civil Aviation (Volokolamskoe shosse 26, Moscow, 123182 Russian Federation).

Please cite this article in English as:

Zubov N.E., Eshchenko A.A., Demin S.S., et al. Effect of the main rotor and other helicopter design features on the performance of satellite radionavigation system user equipment mounted on the craft. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Instrument Engineering*, 2019, no. 4, pp. 71–83 (in Russ.).
DOI: 10.18698/0236-3933-2019-4-71-83