

В.А. Байкин, А.Н. Стецюк

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ИНФОРМАЦИОННОГО УПРАВЛЕНИЯ ФУНКЦИОНИРОВАНИЕМ СИСТЕМЫ КОСМИЧЕСКОЙ СВЯЗИ И НАВИГАЦИИ

**Аннотация.** Предметом исследования является синтез комплекса базовых моделей информационного управления функционированием системы космической связи и навигации, оптимальных по критерию максимума вероятности доведения команды (сигнала) за время, не превышающее требуемого значения при требуемой точности навигационных определений потребителями в течение заданного времени. Решение задачи основано на взвешенном ориентированном графе состояния системы информационного управления функционированием системы космической связи и навигации, объединяющем вероятности нормального функционирования каждого из узлов, вероятности нормального функционирования каналов связи, времена задержки (обработки) команд в узлах и времена передачи команд по каналам связи. Методология исследования базируется на методах теории оптимального управления, системного анализа, теории надежности, теории вероятностей, информационно-логического моделирования. Новизна результатов исследования заключается в разработке комплекса математических моделей применения системы космической связи и навигации, позволяющем оценивать потенциальные информационные возможности таких систем для заданных вариантов их состава, построения и способов применения, а также обосновывать рациональные варианты состава, построения и способов применения их сводных группировок средств космической связи и навигации для гарантированного решения ими целевых задач в заданных условиях обстановки.

**Ключевые слова:** информационное управление, управление космической связью, управление космической навигацией, система космической связи, граф состояния системы, оптимизация функционирования системы, оптимальное управление, информационно-логическое моделирование, космическая радионавигационная система, оптимизация состава системы.

Необходимость обоснования рациональных состава, оперативного построения и способов применения космической связи и навигации предполагает проведение комплексных исследований. Ввиду трудности, а, в большинстве случаев, невозможности натурального полномасштабного эксперимента для таких исследований используют математическое моделирование [1-3, 5, 8-15].

В результате проведенных исследований, анализа моделей, описывающих процесс применения систем космической связи и навигации сформирован комплекс базовых моделей, в состав которого входит математическая модель применения космической системы связи и навигации.

Исходя из целевого предназначения и задач, решаемых космической системой связи (КСС) в качестве основного показателя эффективности ее применения целесообразно использовать вероятность доведения команды (сигнала) за время, не превышающее требуемого значения:

$$W = P(t_{\text{дов}} \leq t_{\text{ТР}}),$$

где  $t_{\text{дов}}$ ,  $t_{\text{ТР}}$  – соответственно реальное и требуемое время доведения команды (сигнала).

При моделировании и оценивании эффективности КСС процесс ее применения формализован направленным графом, узлы которого представляют пункты управления (КП), а ребра – линии связи между ними. Направление передачи команд

(сигналов) отмечают стрелками на соответствующих ребрах графа, узлы и ребра определенным образом нумеруются.

Основными характеристиками элементов в структуре КСС являются [5–12]: вероятности нормального функционирования (вероятность безотказной работы) каждого из узлов  $P_j$ ,  $j = 1, \dots, 7$ ; вероятности нормального функционирования каналов связи  $P_{ijm}$ ,  $i \neq j$ ,  $\forall m$ , где индекс  $m$  указывает на тип (номер) канала связи между  $i$ -м и  $j$ -м узлами; времена  $t_j$  задержки (обработки) команд в узлах; времена передачи команд по каналам связи  $t_{ijm}$ ,  $i \neq j$ .

Значения  $t_j$ ,  $t_{ijm}$  являются случайными величинами, поэтому в качестве характеристик КСС целесообразно использовать оценки средних времен обработки команд в узлах  $t_j$  и средних времен передачи команд по соответствующему каналу связи –  $t_{ij}$ ,  $i \neq j$ , а также соответствующие среднеквадратические отклонения  $\sigma_{ij}$  и  $\sigma_{t_{ij}}$ .

При аналитическом моделировании процесса применения КСС составляется полный перечень всех возможных путей доведения команды до выбранного узла и, используя правила формальной логики, записывается выражение, отображающее условие наступления интересующего события через события его составляющие. Затем, применяя основные положения теории вероятностей, определяются вероятности этих событий  $P(A_{\text{пов}})$ .

Важнейшей системой, обеспечивающей эффективное применение системы космической связи и навигации на удаленных территориях является космическая радионавигационная система (КРНС) [3, 5, 8, 11]. Исходя из целевого предназначения и задач, решаемых КРНС, в качестве основного показателя эффективности ее применения целесообразно использовать вероятность обеспечения требуемой точности навигационных определений потребителями в течение заданного времени [2, 12–17]:

$$W = P(\sigma \leq \sigma_{mp}),$$

где  $\sigma$ ,  $\sigma_{mp}$  – соответственно реальная и требуемая погрешности определения координат потребителей.

В качестве объекта моделирования выступает процесс применения КРНС, использующей пассивный псевдодальномерный метод определения координат потребителей навигационной

информации. Находящиеся на орбите космические аппараты навигации излучают, а потребители на земле (в море, в воздухе, космосе) принимают радионавигационные сигналы. Излучаемый бортовой аппаратурой космического аппарата сигнал содержит информацию о координатах  $(X_i, Y_i, Z_i)$   $i$ -го навигационного космического аппарата на момент сеанса связи с потребителем навигационной информации, и дальности от  $i$ -го навигационного космического аппарата до потребителя, измеренной по задержке излученного сигнала:

$$D_i = (t_{np} - t_{uzl})C,$$

где  $C$  – скорость распространения радиоволны;  $t_{uzl}$ ,  $t_{np}$  – время излучения и приема навигационного сигнала соответственно.

Сдвиг шкалы бортовых часов потребителя и  $i$ -го навигационного космического аппарата на  $\delta_t$  приводит к тому, что у всех измеренных  $i$ -х дальностей появляются добавки  $\Delta D_i = \delta_t \cdot C$ . Погрешность измерения дальности  $\Delta D_i$  может быть включена в систему дальномерных уравнений как дополнительный неизвестный параметр:

$$D_i = \sqrt{(X_o - X_i)^2 + (Y_o - Y_i)^2 + (Z_o - Z_i)^2} + \delta_t \cdot C,$$

где  $X_o$ ,  $Y_o$ ,  $Z_o$  – искомые координаты потребителя.

В этом выражении неизвестны четыре переменные:  $X_o$ ,  $Y_o$ ,  $Z_o$  и  $\delta_t$ . Тогда для определения координат потребителя  $(X_o, Y_o, Z_o)$  и вычисления погрешности хода его бортовых часов ( $\delta_t$ ) необходимо, при известных значениях  $D_i$ ,  $X_i$ ,  $Y_i$ ,  $Z_i$  и  $C$ , решить систему из 4-х уравнений, каждое из которых является выражением для определения дальности от потребителя до  $i$ -го навигационного космического аппарата, где  $i \in \{1, 2, 3, 4\}$ .

Для оценки точности определения координат и скорости потребителей по данным КРНС используется подход, который заключается в умножении некоррелированных и равноточных ошибок измерения дальности и радиальной скорости на геометрический фактор ухудшения точности определения координат потребителя  $G\Phi_{\Sigma}$  или его разновидности:  $G\Phi_{np}$  – показатель, который определяет величину радиальной ошибки в пространстве,  $G\Phi_{nl}$  – характеризующий радиальную ошибку

в горизонтальной плоскости,  $\Gamma\Phi_\theta$  – учитывающий погрешность определения высоты,  $\Gamma\Phi_m$  – характеризующий точность определения времени [1, 3, 5, 11, 12, 15–17].

Все эти показатели являются безразмерными величинами, адекватны системе, обладают чувствительностью к изменению ее характеристик и способа использования, зависят от времени и относительного расположения определяемого объекта и навигационных космических аппаратов, выбранных для измерений. С точки зрения навигационных определений наилучший случай использования системы соответствует одновременному минимуму этих показателей (максимальной точности навигационных определений).

Для вычисления разновидностей  $\Gamma\Phi$  в предположении, что измеренные псевдодальности имеют единичные ошибки при среднем значении равно нулю, и некоррелированы между собой, могут быть использованы следующие выражения:

$$\Gamma\Phi_\Sigma = \sqrt{\text{Trace}(H^T \cdot H)^{-1}} = \frac{\sqrt{\sigma_X^2 + \sigma_Y^2 + \sigma_Z^2 + \sigma_t^2}}{\sigma_D},$$

$$\Gamma\Phi_{\text{пр}} = \frac{\sqrt{\sigma_X^2 + \sigma_Y^2 + \sigma_Z^2}}{\sigma_D}, \quad \Gamma\Phi_{\text{пл}} = \frac{\sqrt{\sigma_X^2 + \sigma_Y^2}}{\sigma_D},$$

$$\Gamma\Phi_B = \frac{\sigma_Z}{\sigma_D}, \quad \Gamma\Phi_T = \frac{\sigma_t}{\sigma_D} \cdot C,$$

$$H = \begin{pmatrix} \alpha_{1X} & \alpha_{1Y} & \alpha_{1Z} & 1 \\ \alpha_{2X} & \alpha_{2Y} & \alpha_{2Z} & 1 \\ \alpha_{3X} & \alpha_{3Y} & \alpha_{3Z} & 1 \\ \alpha_{4X} & \alpha_{4Y} & \alpha_{4Z} & 1 \end{pmatrix},$$

$$\alpha_{iX} = \frac{X_i - X_0}{D_i}; \quad \alpha_{iY} = \frac{Y_i - Y_0}{D_i}; \quad \alpha_{iZ} = \frac{Z_i - Z_0}{D_i};$$

где  $H$  – матрица направляющих косинусов;  $\alpha_{ij}$  – направляющие косинусы преобразования векторов направлений по  $j$ -й координате ( $x, y, z$ ) от потребителя к  $i$ -му навигационному космическому аппарату;  $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$  – среднеквадратические погрешности определения координат потребителя;  $\sigma_t$  – среднеквадратическая ошибка определения поправки шкалы времени потребителя;  $\sigma_D$  – среднеквадратическая ошибка определения дальности от потребителя до навигационного космического аппарата.

При этом точность измерения координат потребителями навигационной информации в пространстве ( $\sigma_{x,y,z}$ ), на плоскости ( $\sigma_{x,y}$ ) и по вертикали ( $\sigma_z$ ) будет определяться выражениями:

$$\sigma_{x,y,z} = \sigma_D \cdot \Gamma\Phi_{\text{пр}}; \quad \sigma_{x,y} = \sigma_D \cdot \Gamma\Phi_{\text{пл}}; \quad \sigma_z = \sigma_D \cdot \Gamma\Phi_B.$$

\*\*\*

Комплекс математических моделей применения системы космической связи и навигации, включающий описанные математические модели применения космической системы связи и навигации, позволяет оценивать потенциальные информационные возможности таких систем для заданных вариантов их состава, построения и способов применения, а также обосновывать рациональные варианты состава, построения и способов применения их сводных группировок средств космической связи и навигации для гарантированного решения ими целевых задач в заданных условиях обстановки.

## Библиография

1. Аджемов С.С., Терешонок М.В., Чиров Д.С. Оптимизация алгоритмов поиска устойчивых групп абонентов систем мобильной радиосвязи // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2009. №1. С. 129-130.
2. Воробьев А.А., Лагойко О.С. Информационно-диагностические системы встроенного контроля состояния воздушных судов // Программные системы и вычислительные методы. 2014. №4. С. 437-445.

3. Воробьев С.Н., Егоров Е.С., Плотников Ю.И. Теоретические основы обоснования военно-технических решений. М.: РВСН, 1994. 372 с.
4. Голосовский М.С., Есев А.А., Богомолов А.В. Комплекс автоматизированной экспертизы технического уровня сложной системы // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2014612330 от 25.02.2014 г. Опубл. 20.03.2014, бюлл. №2. – 1 с.
5. Карпов В.В. Развитие теоретических основ применения Космических войск в современных условиях. М.: ВА РВСН, 2006. 203 с.
6. Коломиец Л.В., Федоров М.В., Богомолов А.В., Мережко А.Н., Солдатов А.С., Есев А.А. Метод поддержки принятия решений по управлению ресурсами при испытаниях авиационной техники // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2010. Т.8. №5. С. 38-40.
7. Кукушкин Ю.А., Богомолов А.В., Ушаков И.Б. Математическое обеспечение оценивания состояния материальных систем // Информационные технологии. 2004. №7. 32 с.
8. Макаренко В.Г., Богомолов А.В., Рудаков С.В. и др. Технология построения инерциально-спутниковой навигационной системы управления транспортными средствами с нейросетевой оптимизацией состава вектора измерений // Мехатроника, автоматизация, управление. 2007. №1. С. 39-44.
9. Макаренко В.Г., Подорожняк А.А., Рудаков С.В. и др. Инерциально-спутниковая навигационная система управления транспортными средствами // Проблемы управления. 2007. №1. С. 64-71.
10. Макаренко С.А., Терешонок М.В., Чиров Д.С. Использование самоорганизующейся нейронной сети на радиальных базисных функциях для повышения помехоустойчивости систем классификации источников радиосигналов // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2010. Т. 4. №11. С. 34-36.
11. Павлов В.М. Методические основы системных исследований военно-космических средств. М.: РВСН, 1998. 235 с.
12. Сологуб А.В., Аншаков Г.П., Данилов В.В. Космические аппараты систем зондирования поверхности Земли: математические модели повышения эффективности космических аппаратов. М.: Машиностроение, 1993. 368 с.
13. Федоров М.В., Калинин К.М., Богомолов А.В., Стецюк А.Н. Математическая модель автоматизированного контроля выполнения мероприятий в органах военного управления // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2011. Т. 9. №5. С. 46-54.
14. Чиров Д.С. Методический подход к обоснованию технических характеристик комплексов радиомониторинга для решения задач распознавания источников радиоизлучения // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2011. Т. 5. №11. С. 85-87.
15. Шибанов Г.П. Оптимизация процесса контроля бортовых комплексов оборудования летательных аппаратов // Мехатроника, автоматизация, управление. 2014. №6. С. 56-61.
16. Шибанов Г.П. Оптимизация систем управления летательным аппаратом по критериям управляемости и наблюдаемости // Мехатроника, автоматизация, управление. 2012. №4. С. 57-61.
17. Шипилов В.В. Концептуальная модель и методология построения унифицированных средств контроля радиоэлектронного оборудования // Автоматизация и современные технологии. 2010. №7. С. 23-27.

### References (transliterated)

1. Adzhemov S.S., Tereshonok M.V., Chirov D.S. Optimizatsiya algoritmov poiska ustoichivyykh grupp abonentov sistem mobil'noi radiosvyazi // T-Comm: Telekommunikatsii i transport. 2009. №1. S. 129-130.
2. Vorob'ev A.A., Lagoiko O.S. Informatsionno-diagnosticheskie sistemy vstroennogo kontrolya sostoyaniya vozдушnykh sudov // Programmnye sistemy i vychislitel'nye metody. 2014. №4. S. 437-445.
3. Vorob'ev S.N., Egorov E.S., Plotnikov Yu.I. Teoreticheskie osnovy obosnovaniya voenno-tekhnicheskikh reshenii. M.: RVSН, 1994. 372 s.

4. Golosovskii M.S., Esev A.A., Bogomolov A.V. Kompleks avtomatizirovannoi ekspertizy tekhnicheskogo urovnya slozhnoi sistemy // Svidetel'stvo o gosudarstvennoi registratsii programmy dlya EVM №2014612330 ot 25.02.2014 g. Opubl. 20.03.2014, byull. №2. – 1 s.
5. Karpov V.V. Razvitie teoreticheskikh osnov primeneniya Kosmicheskikh voisk v sovremennykh usloviyakh. M.: VA RVSН, 2006. 203 s.
6. Kolomiets L.V., Fedorov M.V., Bogomolov A.V., Merezhko A.N., Soldatov A.S., Esev A.A. Metod podderzhki prinyatiya reshenii po upravleniyu resursami pri ispytaniyakh aviatsionnoi tekhniki // Informatsionno-izmeritel'nye i upravlyayushchie sistemy. 2010. T.8. №5. S. 38-40.
7. Kukushkin Yu.A., Bogomolov A.V., Ushakov I.B. Matematicheskoe obespechenie otsenivaniya sostoyaniya material'nykh sistem // Informatsionnye tekhnologii. 2004. №7. 32 s.
8. Makarenko V.G., Bogomolov A.V., Rudakov S.V. i dr. Tekhnologiya postroeniya inertsial'no-sputnikovoi navigatsionnoi sistemy upravleniya transportnymi sredstvami s neirosetevoi optimizatsiei sostava vektora izmerenii // Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie. 2007. №1. S. 39-44.
9. Makarenko V.G., Podorozhnyak A.A., Rudakov S.V. i dr. Inertsial'no-sputnikovaya navigatsionnaya sistema upravleniya transportnymi sredstvami // Problemy upravleniya. 2007. №1. S. 64-71.
10. Makarenkov S.A., Tereshonok M.V., Chirov D.S. Ispol'zovanie samoorganizuyushcheyseya neuronnoi seti na radial'nykh bazisnykh funktsiyakh dlya povysheniya pomekhoustoichivosti sistem klassifikatsii istochnikov radiosignalov // T-Comm: Telekommunikatsii i transport. 2010. T. 4. №11. S. 34-36.
11. Pavlov V.M. Metodicheskie osnovy sistemnykh issledovaniy voenno-kosmicheskikh sredstv. M.: RVSН, 1998. 235 s.
12. Sologub A.V., Anshakov G.P., Danilov V.V. Kosmicheskie apparaty sistem zondirovaniya poverkhnosti Zemli: matematicheskie modeli povysheniya effektivnosti kosmicheskikh apparatov. M.: Mashinostroenie, 1993. 368 s.
13. Fedorov M.V., Kalinin K.M., Bogomolov A.V., Stetsyuk A.N. Matematicheskaya model' avtomatizirovannogo kontrolya vypolneniya meropriyatiy v organakh voennogo upravleniya // Informatsionno-izmeritel'nye i upravlyayushchie sistemy. 2011. T. 9. №5. S. 46-54.
14. Chirov D.S. Metodicheskii podkhod k obosnovaniyu tekhnicheskikh kharakteristik kompleksov radiomonitoringa dlya resheniya zadach raspoznavaniya istochnikov radioizlucheniya // T-Comm: Telekommunikatsii i transport. 2011. T. 5. №11. S. 85-87.
15. Shibanov G.P. Optimizatsiya protsessa kontrolya bortovykh kompleksov oborudovaniya letatel'nykh apparatov // Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie. 2014. №6. S. 56-61.
16. Shibanov G.P. Optimizatsiya sistem upravleniya letatel'nykh apparatov po kriteriyam upravlyaemosti i nablyudaemosti // Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie. 2012. №4. S. 57-61.
17. Shipilov V.V. Kontseptual'naya model' i metodologiya postroeniya unifitsirovannykh sredstv kontrolya radioelektronnogo oborudovaniya // Avtomatizatsiya i sovremennye tekhnologii. 2010. №7. S. 23-27.