

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТАКТИКИ ПОДРАЗДЕЛЕНИЙ СВЯЗИ В УСЛОВИЯХ СОВРЕМЕННОГО ВООРУЖЕННОГО ПРОТИВОБОРСТВА

Тевс О.П.¹, Пустошкин М.М.²

DOI:10.24682/3034-4050-2024-3-5-13

Ключевые слова: формы, способы и приемы действий, комплексная методика, боевое применение, система связи, система управления.

Аннотация

Цель работы: на основе анализа и обобщения исходных данных, разработать модель тактики подразделений связи, и обоснование тактической пригодности существующих и перспективных форм, способов и приемов действий подразделений связи.

Метод исследования сочетает в себе построение комплексных аналитических и имитационных моделей, способных учитывать факторы неопределенности и многоаспектность процессов на этапах боевого применения подразделений связи.

Результаты исследования позволят оценить тактическую пригодность способов построения системы связи и способов боевого применения подразделений связи в динамике боевых действий, противопоставляя их возможным способам воздействия противника. Также позволят сформулировать научно обоснованные требования к универсальной организационно-штатной структуре подразделений связи, тактико-техническим характеристикам комплексов и средств связи, которые способны реализовать систему связи с требуемыми параметрами. Результаты будут положены в основу предложений по разработке новых форм, способов и приемов действий подразделений связи.

Научная новизна: впервые разрабатывается модель тактики подразделений связи, позволяющая осуществить моделирование вероятностных ситуаций, возникающих в ходе боевого применения подразделений связи в условиях современного вооруженного противоборства с противником. Реализуется формализованный подход к выбору (разработке) форм, способов и приемов действий подразделений связи, позволяющий учесть степень их влияния на достижение основных целей соответствующего этапа боевого применения, и вклад в достижение общей цели с учетом складывающейся оперативной обстановки.

Введение

В современном мире, где информационные технологии и средства связи играют незаменимую роль в стратегии ведения военных действий, важность подразделений связи становится очевидной. Эти подразделения являются критически важным звеном, обеспечивающим не только передачу информации, но и оперативное реагирование как на изменения, происходящие на поле боя, так и в системе управления.

Современные вооруженные конфликты характеризуются быстротой принятия решений и необходимостью мгновенного обмена информацией. Тактика подразделений связи должна быть адаптирована к этим условиям.

Моделирование тактики подразделений связи в условиях современного вооруженного противоборства является комплексной и много-

гранной задачей, требующей всестороннего анализа и глубокого понимания специфики современных военных конфликтов.

Современное вооруженное противоборство характеризуется рядом уникальных вызовов и угроз, среди которых:

- ❖ высокая мобильность и динамичность боевых действий, требующие от подразделений связи оперативности и адаптивности в развертывании и перестроении системы связи;
- ❖ использование высоко наукоёмких технологий, включая кибернетические атаки, которые могут подрывать работу системы связи;
- ❖ адаптация противника к изменяющимся условиям ведения войны, что требует постоянного обновления тактики и методов работы.

¹Тевс Олег Павлович, кандидат военных наук, доцент, начальник кафедры боевого применения войск связи Военной академии связи, г. Санкт-Петербург, Россия. E-mail: tevsolog@rambler.ru

²Пустошкин Максим Михайлович, адъюнкт кафедры боевого применения войск связи Военной академии связи, г. Санкт-Петербург, Россия. E-mail: max.pustoshkin@yandex.ru

Эти факторы ставят перед подразделениями связи задачи, требующие гибкости, способности к быстрой адаптации и эффективной работы в условиях ограниченного времени и ресурсов. Решение сложных задач определяется выбором соответствующих форм, способов и приемов действий подразделений связи, которые выражают в совокупности тактику подразделений связи.

Современные боевые действия предъявляют высокие требования к тактике подразделений связи. Постоянно меняющаяся оперативная обстановка и высокая степень угрозы требуют эффективного и гибкого подхода к управлению системами и средствами связи.

Опыт проведения специальной военной операции (СВО) изменил взгляды на порядок ведения военных действий, бывшие прежде эпизодическими действия по нарушению управления войсками противника превратились в специальные операции, ставшие неотъемлемым компонентом общевойсковых операций. В этих целях разрабатываются и совершенствуются необходимые средства разведки и поражения, а также тактика их применения. В таких условиях комплексному воздействию противника на войска и систему связи должна быть противопоставлена тактика подразделений связи, обеспечивающая своевременное и полное выполнение стоящих перед ними задач с минимальными потерями в технике и живой силе.

Соответствующая реалиям боя тактика войск связи обеспечивает эффективность применения подразделений и средств связи, позволяет сократить потери сил и средств связи и как следствие повысить функционирование системы связи. В итоге при прочих равных условиях повышаются устойчивость, непрерывность, оперативность и скрытность управления войсками в условиях деструктивного воздействия противника [1,7].

Постановка задачи

Опыт проведения СВО показал необходимость изменения в теории тактики подразделений связи, при этом особое внимание требуется уделять научному обоснованию форм и способов применения подразделений связи в вооруженных конфликтах, поиску путей повышения их мобильности, разработке оптимальных организационно-штатных структур, вопросам эффективного управления и всестороннего обеспечения в ходе боевых действий.

Формы и способы построения системы связи и применения войск связи в ходе СВО определяются характерными чертами современных вооруженных конфликтов, к основным из них относятся:

- применение группировок войск (сил) в штате мирного времени;

- оказание явной и скрытой военно-технической помощи противоборствующим сторонам развитыми в военно-техническом отношении государствами, объединенными в военно-политические союзы;
- очаговый характер ведения боевых действий общевойсковыми формированиями на разобщенных направлениях;
- относительно статичное положение оперативных группировок войск и высокая мобильность тактических групп;
- отсутствие элементов оперативного оборудования районов ведения боевых действий, значительное удаление баз материально-технического обеспечения действий группировок войск (сил);
- преимущественное ведение боевых действий в населенных пунктах либо в районе крупных объектов инфраструктуры;
- широкое распространение маневренных и диверсионных действий;
- угроза возникновения аварий и экологических катастроф на крупных промышленных объектах, находящихся в зоне вооруженного столкновения;
- стремление противоборствующих сторон решать оперативные и тактические задачи дальним огневым поражением, в основном ракетными и артиллерийскими системами;
- широкое применение всеми сторонами технологически сложных комплексов вооружения, в первую очередь БПЛА, БЭК и т. п.;
- существенное влияние на успех вооруженной борьбы ведения радиоэлектронной борьбы и противоборства в киберпространстве;
- создание и широкое применение тактических разведывательно-ударных систем (например, связка квадрокоптер и миномет);
- поражение объектов системы управления высокоточным оружием [1,10].

Тактика войск связи отражает те формы, способы и приемы действий, которые присущи только подразделениям связи. Она учитывает организационно-штатную структуру, целевое назначение и боевые возможности подразделений связи, особенности и тактико-технические характеристики средств связи, находящихся у них на снабжении, оперативные условия боевых действий, применяемую противником тактику комплексного воздействия, а также влияние физико-географических условий на способность выполнять боевые задачи. По своему содержанию тактика войск связи представляет собой взаимоувязанную совокупность теории и практики подготовки, боевого примене-

ния и всестороннего обеспечения войск связи в операции (бою) (рис.1).

Тактика подразделений связи, являясь частью тактики специальных войск, увязана прежде всего с тактикой того вида ВС, рода войск или специальных войск, в состав которых они организационно включены. Это определяется тем, что войска связи в ходе операции (бою) действу-

ют совместно с войсками других родов войск и специальных войск объединения (соединения). Следовательно, общая тактика (тактика вида и рода войск и специальных войск) является общей категорией для всех воинских формирований, входящих в рассматриваемое объединение (соединение) и оказывает, в частности, на тактику войск связи определяющее влияние.

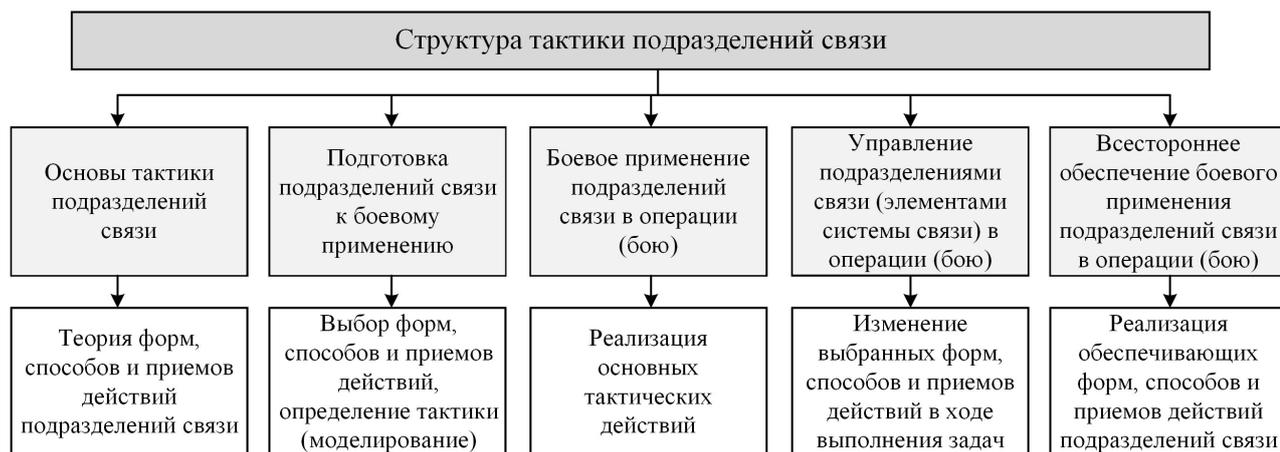


Рис.1. Структура тактики подразделений связи

Тактика подразделений связи является общим, связывающим звеном в деятельности должностных лиц отдела связи и частей (подразделений) связи. Не зная основных приемов и способов боевого применения и возможностей подчиненных подразделений связи по их реализации, должностные лица органа управления связью не в состоянии спланировать дееспособную систему связи. Кроме того, должностные лица органа управления связью в ходе операции (бою) должны быть в курсе не только обстановки по связи, но и оперативно-тактической (тактической) обстановки, уметь прогнозировать ее развитие и своевременно корректировать применяемую тактику. Для решения этих задач требуется научно-методический аппарат, позволяющий осуществлять моделирование вероятных ситуаций и производить оценку тактической пригодности различных форм, способов и приемов действий подразделений связи [2,9].

Решение задачи

Моделирование тактики подразделений связи становится крайне актуальным в условиях высоких темпов изменений, связанных с развитием технологий, и является одним из эффективных инструментов поддержки выработки замысла и принятия решения на боевые действия, которые

нередко выполняются в условиях ограничений на располагаемое время и требуют рациональной организации самого процесса. В этих условиях соблюдение баланса времени часто обеспечивают за счет уменьшения количества моделируемых сценариев боевых действий (рассматриваемых вариантов замысла), заменяя математическое моделирование интуитивными оценками сравнительной эффективности различных вариантов замысла. Однако интуитивный подход к оценке сложных процессов порой может приводить к значительным ошибкам, которые приводят к потерям в технике и живой силе [3].

Цель моделирования заключается в разработке на основе анализа и обобщения исходных данных комплексной методики формирования тактики подразделений связи, а также в обосновании тактической пригодности существующих и перспективных форм, способов и приемов действий подразделений связи.

В основу разработки модели тактики подразделений связи положен подход, суть которого заключается в использовании метода, сочетающего в себе построение комплексных аналитических и имитационных моделей, способных учитывать факторы неопределенности и многоаспектность процессов на этапах боевого применения и методик расчета и оценки численных значений необхо-

димых показателей. Выбор этого подхода вызван присутствием системной, структурной и функциональной сложности предмета исследования.

Модель тактики подразделений связи (рис.2) базируется на принципах системного подхода, что обеспечивает взаимосвязь входящих в ее состав математических моделей и блока единых исходных данных. Модель включает в себя четыре основных раздела:

1. Формирование исходных данных и внешних

факторов, определяющих особенности организации связи в предстоящей операции (боевых действиях).

2. Разработка форм и способов боевого применения подразделений связи на этапах операции (боевых действий).

3. Моделирование форм и способов воздействия противника на систему связи.

4. Моделирование тактики подразделений связи в операции (боевых действиях).

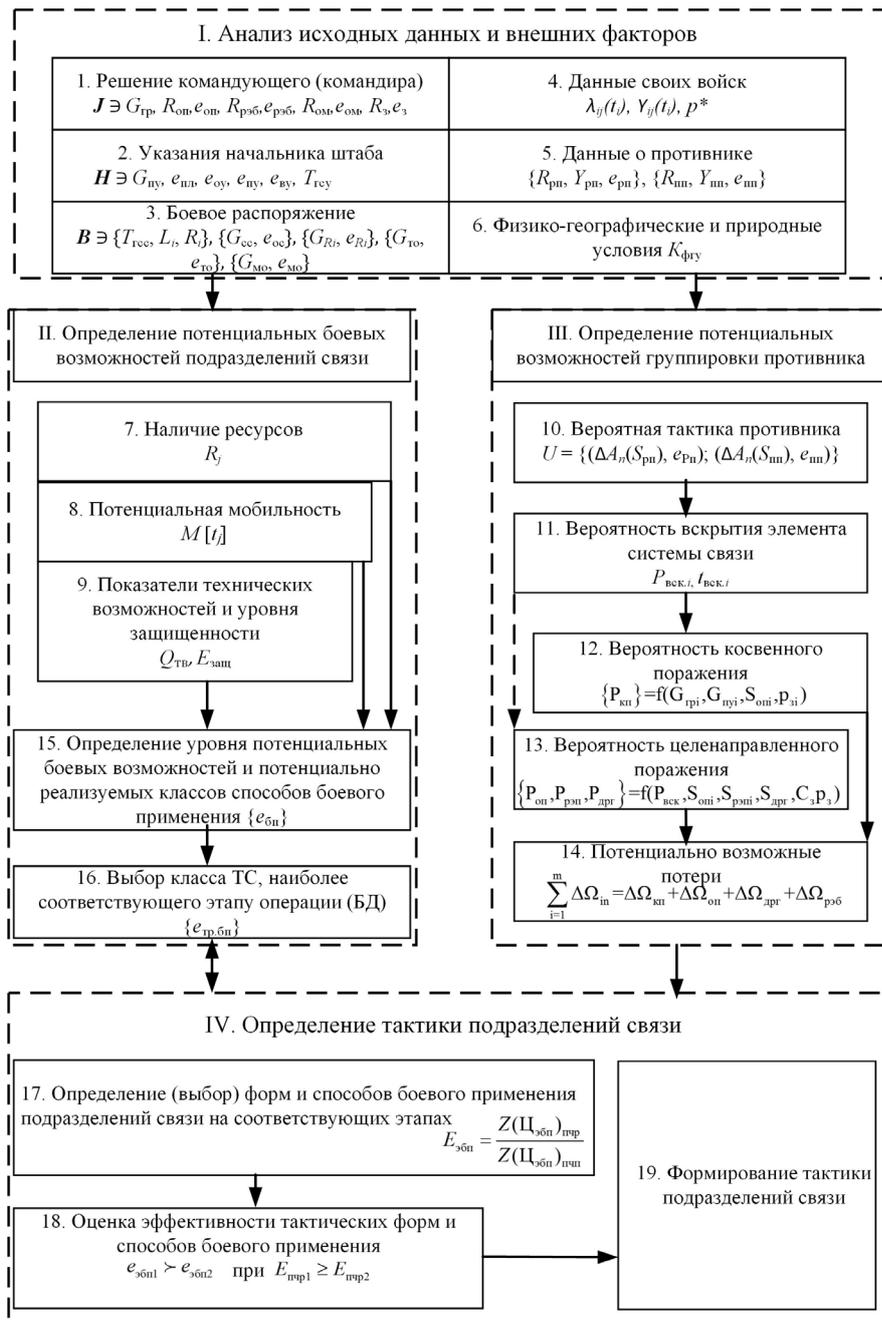


Рис.2. Модель тактики подразделений связи

На первом этапе моделирования производится анализ исходных данных и внешних факторов, оказывающих влияние на боевое применение подразделений связи в предстоящей операции. Их основными источниками будут служить:

1. Решение командующего (командира) на операцию (боевые действия) (блок 1.). Из его содержания определяется структура создаваемой группировки ($G_{гр}$), способы огневого поражения противника ($e_{он}$), способы применения средств РЭБ ($e_{рэб}$), способы оперативной (тактической) маскировки ($e_{ом}$), способы защиты войск от воздействия противника ($e_з$), ресурс средств огневого поражения и РЭБ ($R_{он}$, $R_{рэб}$), оперативной маскировки ($R_{ом}$) и защиты ($R_з$), выделенный общевойсковым командованием в интересах повышения живучести системы управления и связи.
2. Указания начальника штаба по организации управления в предстоящей операции (боевых действиях) (блок 2). Из их содержания определяется структура подсистемы пунктов управления создаваемой группировки ($G_{пу}$), каким способом будет осуществляться планирование ($e_{пл}$), способы обеспечения устойчивого, непрерывного оперативного и скрытого управления войсками создаваемой группировки ($e_{ов}$), способы передачи управления при перемещении пунктов управления и при выходе их из строя ($e_{пу}$), способы восстановления потерянного управления ($e_{вы}$), способы организации взаимодействия ($e_{овз}$), время готовности системы управления к началу функционирования ($T_{гcy}$).
3. Боевое распоряжение старшего штаба (блок 3). Из его содержания получим следующие данные: время готовности системы связи ($T_{гcc}$), топологические параметры (L_i) и структуру системы связи вышестоящего штаба (G_{cc}), количественный и качественный состав ресурсов всех видов, выделяемых в интересах рассматриваемой группировки (R_i), их структуру размещения (G_{Ri}) и способы применения (e_{Ri}), структуру подсистемы технического обеспечения ($G_{то}$), способы ее функционирования ($e_{то}$), структуру подсистемы материального обеспечения ($G_{мо}$), способы организации снабжения ($e_{мо}$), способы организации связи с вышестоящим штабом и взаимодействующими группировками (e_{cc}).
4. Требования нормативных документов по связи, статистические данные, полученные в ходе выполнения задач, результаты проведения исследований в данной области военной науки (блок 4). Определяют требуемую интенсивность по-

токов сообщений всех видов на соответствующих информационных направлениях $\|\lambda_{ij}\|$, требуемый уровень исполненной нагрузки — $\|Y_{ij}\|$, требуемое качество связи — p^* на информационных направлениях.

5. Сведения о противнике, полученные в результате проведения разведывательных мероприятий (блок 5). К ним относятся: общий ресурс средств разведки и РЭП ($R_{рн}$), общий ресурс средств поражения ($R_{ин}$), характеристики комплексов разведки, РЭП и средств поражения ($Y_{рн}$, $Y_{ин}$), способы их применения ($e_{рн}$, $e_{ин}$).
6. Физико-географические и природные условия (блок 6). Данный раздел сведений представлен коэффициентами ($K_{фгп}$), применяемыми при расчете нормативного времени реализации различных тактических способов в реальных природных и географических условиях, характерных для региона, в котором проводится операция и учитывающим время года, время суток, рельеф местности, растительный покров, почвогрунты и т. п.

На втором этапе моделирования, осуществляется определение численных значений показателей боевых потенциальных возможностей подразделений связи:

- определение количества аппаратных, личного состава, запасов материальных средств в подразделениях связи (R_j) (блок 7);
- потенциальной мобильности аппаратных подразделений связи $M [t_i]$ (блок 8);
- технических возможностей аппаратных подразделений связи ($Q_{тр}$) и их уровня защищенности с учетом выделенных средств активной и пассивной защиты, поражения и маскировки ($E_{защ}$) (блок 9).

В результате производится оценка степени соответствия имеющегося комплекта подразделений связи объему предстоящих задач, уровня их боевых потенциальных возможностей и осуществляется определение множества (класса) потенциально реализуемых способов боевого применения подразделений связи $\{e_{бп}\}$ (блок 15). В заключении определяется класс способов боевого применения, наиболее соответствующего условиям предстоящей операции $\{e_{тр.бп}\}$ (блок 16).

В случае несоответствия уровня потенциальных боевых возможностей объему предстоящих задач, производится расчет требуемого ресурса и направляется запрос на его поставку.

Определение (выбор) конкретных способов боевого применения в рамках требуемого класса (блок 17) производится в соответствии с методиками формирования способов совершения

марша и оценки их эффективности, и формирования и оценки эффективности способов боевого применения подразделений связи на этапах развертывания (свертывания) и функционирования системы связи [4].

Далее производится оценка тактической пригодности разработанного способа боевого применения (блок 18) путем моделирования прогнозируемых условий боевого применения (блок 19).

Совокупность тактически пригодных способов будут составлять стратегии на соответствующих этапах боевого применения, противопоставляемые стратегиям воздействия противника.

На третьем этапе производится расчет потенциальных возможностей противника по вскрытию и комплексному воздействию на системы управления и связи. Расчеты осуществляются на основании имеющихся данных о количественном и типовом составе группировки противника, вероятном замысле на предстоящую операцию, принятых оперативных тактических нормативах и его представлениях о формах и способах ведения разведки и нанесения поражения системе управления.

В соответствии с проведенным анализом опыта специальной военной операции основным средством воздействия является нанесение высокоточных артиллерийских и ракетных ударов, в том числе применение БПЛА самолетного и квадрокоптерного типа, радиоэлектронные удары и действия ДРГ. Следует учитывать, что элементы системы связи будут подвергаться как прямому, так и косвенному поражению, которое характерно при нанесении ударов по объектам с сильнодействующими ядовитыми веществами, ядерным объектам, позиционным районам ракетных войск, разрушении плотин, в зонах сплошных пожаров и т. д. [5,8].

В расчетно-аналитическую часть рассматриваемой модели помимо уже имеющихся данных о противнике, включены следующие компоненты:

1. Уровень осведомленности противника о топологии системы связи и характеристиках ее элементов. Он выражен показателем вероятности вскрытия объектов системы связи ($P_{вск.i}$) за определенное время $t_{вск.i}$.
2. Тактика комплексного воздействия противника. Она складывается из тактики ведения разведки и тактики нанесения поражения. Тактика ведения разведки определяется вероятным распределением ресурса разведки по дням (этапам) операции — $\Delta A_n(S_{пп})$ и применяемыми формами и способами ведения разведки — $\{e_{пп}\}$. Тактика нанесения поражения опре-

деляется вероятным распределением ресурса сил и средств поражения по дням (этапам) операции — $\Delta A_n(S_{пп})$, применяемыми формами и способами, а также вероятной интенсивностью нанесения поражения — $\{e_{пп}\}$.

Для каждого этапа операции определяется его длительность (в соответствии с решаемой задачей) и ресурс сил и средств разведки и поражения. Удаление средств поражения противника указывается от линии соприкосновения войск.

В модели отражен полный перечень характеристик структуры и поведения элементов системы связи, которые может получить противник в результате проведения разведывательных действий ($e_{пп}$) и объективно существующего множества демаскирующих признаков $x_{пj}$ j -го элемента системы связи. Для обеспечения требуемой степени адекватности, в модель вносятся следующие сведения о войсках и элементах системы связи:

- наименование (условный номер) элемента системы связи (подразделения связи).
- его тип (полевой, стационарный, защищенный и т. д.);
- каким типом цели представляется противнику (подвижной, неподвижной, точечной, линейной, площадной);
- его относительные координаты и удаление от линии соприкосновения;
- разведывательная доступность элемента системы связи (подразделения связи), виды разведки и типы средств разведки, которым он доступен;
- характеристики демаскирующих признаков элементов системы связи.

Распределение средств поражения осуществляется исходя из потенциальной возможности вскрытия объекта за время его функционирования, его важности с точки зрения противника, характеристик средств поражения, пространственных показателей и т. д. Суть решения задачи на данном этапе заключается в распределении средств поражения по элементам системы связи (подразделениям связи, выполняющим поставленные перед ними задачи). Критерием выбора цели (объекта) для комплексного воздействия является функционал:

$$Ц_i = \max f(V_i, P_{вск.i}),$$

где V_i — коэффициент важности (вес) i -го объекта системы связи по взглядам противника;

$P_{вск.i}$ — вероятность вскрытия i -го объекта системы связи.

"Вес" объекта будет определяться составом и типом средств связи, размещенных на данном

элементе, которые будут своими демаскирующими признаками выдавать противнику его иерархическую и функциональную принадлежность.

В модели принято допущение, что если объект системы связи доступен разведке противника и функционирует на протяжении времени, превышающего время его вскрытия, то $P_{вск.i} = 1$, а если меньше, то $P_{вск.i} = 0$. Для всех стационарных объектов $P_{вск.i} = 1$, при $t_{вск.я} = 0$.

В модели заложена возможность проведения расчетов степени снижения вероятности вскрытия объектов системы связи в результате применения различных способов защиты.

При применении указанных способов защиты на элементах системы связи производится корректировка рассчитанного значения $P_{вск.i}$ в соответствии с их вкладом по выражению:

$$P_{вск.i} = P_{вск.i} \times \prod_{j=1}^N E_{защj},$$

где $E_{защj}$ — коэффициент, учитывающий влияние j -го способа защиты, N — общее количество используемых способов защиты.

В модели реализована возможность расчета снижения потенциала противника — производится расчет вероятного снижения ресурса средств поражения противника по дням (этапам) операции (боевых действий) при применении определенных средств и способов поражения активной и пассивной защиты, а также расчета показателей ресурса восполнения потерь сил и средств связи по этапам операции (боевых действий) (ΔR).

На основании полученных данных, оценивается объективная живучесть элементов системы связи и безопасность действий войск при реализации различных тактических форм и способов.

Заключение

Разработанная модель тактики подразделений связи позволяет исследовать разработанные формы и способы боевого применения подразделений связи в динамике противоборства с противником в ходе операции (боя). Так, в результате боевого применения подразделений связи j -м способом начнут проявляться демаскирующие признаки $x_{иj}$ элементов системы связи (подразделений, выполняющих определенные задачи). Противник, используя силы и средства разведки, получит параметры элементов системы связи $x_{вскij}$ и проведет их идентификацию $\{P_{вск.i}\}$, осуществит ранжирование элементов системы связи (ЭСС)

по убыванию коэффициента важности $\|M_{ц}\|$, примет решение на поражение их определенной части каким либо способом $S_{цн1}$. Средства поражения (СП) в модели выделяются в зависимости от их досягаемости соответствующих ЭСС. Для воздействия на стационарные объекты системы связи в модели заложено правило выделять крылатые ракеты, управляемые авиабомбы и БПЛА самолетного типа.

В модели предусмотрено, что выделение наряда СП против конкретного элемента системы связи производится с расчетом их гарантированного поражения, то есть ущерб огневого воздействия составляет не менее 80%.

В результате применяемого воздействия нашей системы связи (подразделениям) будет нанесен определенный ущерб $\Delta \sum \Omega$.

Для оценки результатов деятельности противника используется система параметров его разведывательных комплексов и средств поражения ($x_{вск.с_{пр}}$, $x_{вск.с_{пм}}$), проводится их идентификацию и определяются способы воздействия ($e_{п}$) на них по методике аналогичной методике формирования тактики воздействия противника. Дополнительно необходимо осуществить определение показателей эффективности ПВО ($p_{пво}$) и применяемых способов «активной» и «пассивной» защиты системы связи. К этим способам относятся:

- использование в системе связи ложных объектов и проведение различных дезинформационных мероприятий — $e_{дез}$;
- уничтожение сил и средств разведки и РЭБ противника, средств огневого поражения и ДРГ — $e_{ун}$;
- создание преднамеренных помех разведывательным комплексам и средствам РЭБ — $e_{пм}$.

Таким образом динамично проигрываются вероятные ситуации развития тактической обстановки на всех этапах боевого применения подразделений связи.

Модель тактики подразделений связи позволяет оценить тактическую пригодность способов построения системы связи и способов боевого применения подразделений связи в динамике боевых действий, противопоставляя их возможным способам воздействия противника. Это обеспечивается возможностью в режиме диалога вводить:

- перемещение объектов;
- изменение линии соприкосновения войск;
- изменения структуры системы связи в ходе каждого этапа операции (боя);
- изменения в структуре резерва системы связи;
- различную степень интенсивности восполнения ресурса системы связи;

- изменения в системе «видимых» противником параметров структуры и функционирования системы связи при применении различных тактических способов и в сочетании их со способами активной и пассивной защиты;
- параметры комплексного воздействия противника различными способами и динамику их изменения в режиме реального времени при смене тактики или при использовании способов активной и пассивной защиты системы связи.

В качестве результатов использования модели появляется возможность:

- разработать тактику подразделений связи на всех этапах операции (боевых действий);
- выявить потенциальную тактику воздействия противника и определить наиболее опасные способы;
- рассчитать характеристики реальных боевых возможностей подразделений и системы связи;
- определить обоснованность применения различных классов тактических способов;
- определить необходимость применения тех, или иных способов активной или пассивной защиты элементов системы связи.

Полученные результаты позволят сформулировать научно обоснованные требования к универсальной организационно-штатной структуре подразделений связи, тактико-техническим характеристикам комплексов и средств связи, которые способны реализовать систему связи с требуе-

мыми параметрами. Указанные требования будут положены в основу предложений по разработке новых форм, способов и приемов действий подразделений связи.

Оценку выдвинутых предложений следует проводить путем сравнения численных значений основных показателей боевых потенциальных возможностей подразделений связи существующих и предлагаемых организационно-штатных структур, а также их боевых реальных возможностей при использовании существующих и разработанных форм, способов и приемов действий подразделений связи в современных военных конфликтах.

Моделирование тактики подразделений связи в условиях современного вооруженного противоборства представляет собой сложный и многогранный процесс, требующий учёта множества факторов. Эффективная организация связи, способность к быстрой адаптации и использование современных технологий являются ключевыми элементами для успешного выполнения задач в условиях современных боевых действий. В условиях быстроменяющейся обстановки, наличие чёткой и надёжной системы связи может стать решающим фактором, определяющим исход сражения.

С развитием технологий, таких как 5G, искусственный интеллект и беспилотные системы, открываются новые горизонты для совершенствования работы подразделений связи. Важно учитывать эти инновации при моделировании тактики, чтобы оставаться конкурентоспособными и готовыми к вызовам современного поля боя.

Литература

1. Воробьев И.Г., Романов В.М. Развитие форм и способов построения системы связи тактического звена управления // Военная Мысль. 2022. № 6. С. 61—70.
2. Иванов В.Г., Баширов С.Ю., Лукьянчик В.Н. Обоснования понятия «тактика войск связи», ее структуры, содержания и направления развития с учетом опыта специальной военной операции // Военно-теоретический журнал: Военная мысль № 2. – М.: МО РФ, 2024. С. 31.
3. Корепанов В.О., Шумов В.В. Моделирование военных, боевых и специальных действий // Военно-теоретический журнал: Военная мысль № 1. – М.: МО РФ, 2023. С. 28.
4. Иванов В.Г. Модель технической основы системы управления специального назначения в едином информационном пространстве на основе конвергентной инфраструктуры системы связи: монография. СПбГУ. СПб., 2018. 214 с.
5. Тевс О.П., Исаченко В.Г. Особенности и выводы организации и обеспечения связи при проведении специальной военной операции // Итоги науки и техники: научно-технический сборник № 120. Труды академии. – СПб.: ВАС, 2022. С. 64–70.
6. Иванов В. Г. Основы построения и оценки эффективности функционирования системы связи специального назначения в международном вооруженном конфликте на основе многосферной и конвергентной структуры ее элементов: Монография. – СПб.: ПОЛИТЕХ, 2023. – 298 с.
7. Пустошкин М.М., Степынин Д.В., Филимоненков М.Х., Васильева Т.Г., Ульянов В.В. Направления развития вооруженной борьбы, влияющие на тактику войск связи // Научно-практический междисциплинарный журнал: «Стратегическая стабильность» №4 (109). – 2024, стр. 7–40.
8. Пустошкин М.М. Способы и приемы действий соединений, воинских частей и подразделений связи общевойсковой объединения в условиях современного вооруженного противоборства // Итоги науки и техники: научно-технический сборник № 124. Труды академии. – СПб.: ВАС, 2023. С. 503–508.
9. Пустошкин М.М., Анализ тактики применения соединений (воинских частей, подразделений) связи в условиях современного вооруженного противоборства // Сборник научных трудов III международной научно-практической конференции: Карбышевское чтение «Наше дело правое – победа будет за нами», т. 6 – Тюмень.: ТВВИКУ, 2024. стр. 62-67.
10. Пустошкин М.М., Ульянов В.В., Шамсутдинова Е.Ю. Основные направления совершенствования тактики соединений, частей и подразделений связи в условиях современного вооруженного противоборства // Сборник научных трудов научной конференции «Повышение обороноспособности государства 2024» - Военный учебный центр СПбГУ. – СПб.: 2024. стр. 13–17.

MODELING OF TACTICS OF COMMUNICATION UNITS IN THE CONDITIONS OF MODERN ARMED CONFRONTATION

Tevs O. P.¹, Pustoshkin M. M.²

Keywords: forms, methods and techniques of action, complex methodology, combat use, communication system, control system.

Abstract

The purpose of the work: on the basis of the analysis and generalization of the initial data, to develop a model of tactics of communication units, and to substantiate the tactical suitability of existing and future forms, methods and techniques of actions of communication units.

The research method combines the construction of complex analytical and simulation models capable of taking into account the factors of uncertainty and multifaceted processes at the stages of combat use of communication units.

The results of the study will make it possible to assess the tactical suitability of the methods of building a communication system and the methods of combat use of communication units in the dynamics of combat operations, contrasting them with the possible methods of the enemy's influence. It will also make it possible to formulate scientifically based requirements for the universal organizational and staff structure of communication units, tactical and technical characteristics of complexes and means of communication that are capable of implementing a communication system with the required parameters. The results will form the basis of proposals for the development of new forms, methods and methods of action of communication units.

Scientific novelty: for the first time, a model of tactics of communication units is developed, which makes it possible to simulate probabilistic situations that arise in the course of combat use of communication units in the conditions of modern armed confrontation with the enemy. A formalized approach to the selection (development) of forms, methods and techniques of actions of signal units is implemented, which allows taking into account the degree of their influence on the achievement of the main goals of the corresponding stage of combat and contribute to the achievement of the overall objective in the light of the evolving operational environment.

References

1. Vorob'ev I.G., Romanov V.M. Razvitie form i sposobov postroenija sistemy svjazi takticheskogo zvena upravlenija // Voennaja Mysl'. 2022. № 6. S. 61—70.
2. Ivanov V.G., Bashirov S.Ju., Luk'janchik V.N. Obosnovanija ponjatija «taktika vojsk svjazi», ee struktury, sodержanija i napravlenija razvitiija s uchetom opyta special'noj voennoj operacii // Voенно-teoreticheskij zhurnal: Voennaja mysl' № 2. – M.: MO RF, 2024. S. 31.
3. Korepanov V.O., Shumov V.V. Modelirovanie voennyh, boevyh i special'nyh dejstvij // Voенно-teoreticheskij zhurnal: Voennaja mysl' № 1. – M.: MO RF, 2023. S. 28.
4. Ivanov V.G. Model' tehnicheckoj osnovy sistemy upravlenija special'nogo naznachenija v edinom informacionnom prostranstve na osnove konvergentnoj infrastruktury sistemy svjazi: monografija. SPbPU. SPb., 2018. 214 s.
5. Tevs O.P., Isachenko V.G. Osobennosti i vyvody organizacii i obespechenija svjazi pri provedenii special'noj voennoj operacii // Itogi nauki i tehniki: nauchno-tehnicheckij sbornik № 120. Trudy akademii. – SPb.: VAS, 2022. S. 64—70.
6. Ivanov V. G. Osnovy postroenija i ocenki jeffektivnosti funkcionirovanija sistemy svjazi special'nogo naznachenija v mezhdunarodnom vooruzhenom konflikte na osnove mnogosfernoj i konvergentnoj struktury ee jelementov: Monografija. – SPb.: POLITEH, 2023. – 298 s.
7. Pustoshkin M.M., Stepynin D.V., Filimonenkov M.H., Vasil'eva T.G., Ul'janov V.V. Napravlenija razvitiija vooruzhennoj bor'by, vlijajushhie na taktiku vojsk svjazi // Nauchno-prakticheskij mezhdisciplinarnyj zhurnal: «Strategicheskaja stabil'nost'» №4 (109). – 2024, str. 7—40.
8. Pustoshkin M.M. Sposoby i priemy dejstvij soedinenij, vojskih chastej i podrazdelenij svjazi obshhevojskovogo ob#edinenija v uslovijah sovremennogo vooruzhennogo protivoborstva // Itogi nauki i tehniki: nauchno-tehnicheckij sbornik № 124. Trudy akademii. – SPb.: VAS, 2023. S. 503—508.
9. Pustoshkin M.M., Analiz taktiki primenenija soedinenij (vojskih chastej, podrazdelenij) svjazi v uslovijah sovremennogo vooruzhennogo protivoborstva // Sbornik nauchnyh trudov III mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii: Karbyshevskoe chtenie «Nashe delo pravoe – pobeda budet za nami», t. 6 – Tjumen': TVVIKU, 2024. str. 62-67.
10. Pustoshkin M.M., Ul'janov V.V., Shamsutdinova E.Ju. Osnovnye napravlenija sovershenstvovanija taktiki soedinenij, chastej i podrazdelenij svjazi v uslovijah sovremennogo vooruzhennogo protivoborstva // Sbornik nauchnyh trudov nauchnoj konferencii «Povyshenie oboronosposobnosti gosudarstva 2024» - Voennyj uchebnyj centr SPbPU. – SPb.: 2024. str. 13—17.

¹Oleg Pavlovich Tevs, Candidate of Military Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Combat Use of Signal Troops, Military Academy of Communications, St. Petersburg, Russia. E mail: tevsolog@rambler.ru

²Maxim M. Pustoshkin, Adjunct of the Department of Combat Use of Signal Troops, Military Academy of Communications, St. Petersburg, Russia. E mail: max.pustoshkin@yandex.ru

МЕТОД КООРДИНАТОМЕТРИИ ДВУХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ, ОСНОВАННЫЙ НА ИСПОЛЬЗОВАНИИ ЗЕМНЫХ СТАНЦИЙ

Глебов Р.М.¹, Севидов В.В.²

DOI:10.24682/3034-4050-2024-3-14-19

Ключевые слова: радиотехническая станция, координаты, вектор скорости, временная задержка, частотный сдвиг, эффект Доплера, итерационный алгоритм.

Аннотация

Цель статьи: Представить метод и основные аналитические соотношения по оценке координат и векторов скорости двух космических аппаратов на основе временных задержек и частотных сдвигов радиосигналов земных станций измеренных наземной радиотехнической станцией. Указанные временные задержки и частотные сдвиги обусловлены разными расстояниями и доплеровскими сдвигами частот одних и тех же реализаций радиосигналов на различных радиотрассах.

Метод исследования: В ходе исследования использовались методы моделирования и математического анализа. При решении уравнения второго порядка использовался итерационный метод Ньютона-Рафсона с разложением функций в ряды Тейлора с точностью до первых производных.

Результат: в статье представлен метод координатометрии двух космических аппаратов с использованием земных станций. Представлены основные выражения для временных задержек радиосигналов земных станций, ретранслированных космическими аппаратами. Составлена система из не менее шести независимых уравнений. Результатом решения системы уравнений является координаты двух космических аппаратов. Представлены основные выражения для доплеровских сдвигов частот радиосигналов земных станций, ретранслированных космическими аппаратами. Составлена система из не менее шести независимых уравнений. Результатом решения системы уравнений является ортогональные составляющие векторов скоростей двух космических аппаратов.

Научная новизна: На основе радиосигналов не менее шести земных станций с известными координатами, последовательно ретранслированных и принятых наземной радиотехнической станцией от двух космических аппаратов, определяются координаты и векторы скоростей указанных космических аппаратов. При этом нет необходимости синхронизации с излучением радиосигналов земных станций, что является необходимым условием существующих методов координатометрии.

1. Введение

При прогнозе координат космического аппарата (КА) учитывают ряд факторов, приводящих к отклонениям КА от идеальной (Кеплеровой) орбиты. В качестве таких факторов, например, для КА на низких орбитах выступают: влияние сопротивления атмосферы Земли, светового давления, притяжения планет и др. Таким образом, определение координат и вектора скорости КА в начальный момент времени t_0 с высокой точностью является важной задачей, которая решена при разработке метода координатометрии (МКМ) двух КА с использованием земных станций (ЗС).

Особенность разработанного МКМ двух КА с использованием ЗС заключается в том, что одновременно оцениваются координаты и вектора скорости основного (ОКА) и смежного космического аппарата (СКА).

2. Постановка задачи

Основополагающей предпосылкой предложенного технического решения является наличие помимо ОКА S_1 , через который организуется канал связи между земными станциями, СКА S_2 , который способен ретранслировать те же самые радиоизлучения что и ОКА, но с большим ослаблением и другой частотой переноса [1–5]. Таким образом, за счет корреляционной обработки радиосигналов, возможно получение значений временных задержек и доплеровских сдвигов частот между радиосигналами принятыми приемной радиотехнической станцией (ПРТС) от ОКА S_1 и СКА S_2 , после их ретрансляции ОКА S_1 и СКА S_2 соответственно для каждой из выбранных ЗС I_n [6–10].

На рисунке 1 представлена геометрическая основа разработанной аналитико-имитационной

¹Глебов Роман Михайлович, кандидат военных наук, доцент кафедры радиоэлектронной борьбы Военной академии связи, г. Санкт-Петербург, Россия. E-mail: irbis453@mail.ru

²Севидов Владимир Витальевич, кандидат технических наук, доцент, докторант кафедры радиоэлектронной борьбы Военной академии связи, г. Санкт-Петербург, Россия. E-mail: v-v-sevidov@mail.ru

модели (АИМ) КМ двух КА с использованием ЗС, включающая позиции ОКА S_1 , и СКА S_2 , земных станций I_n и ПРТС K .

тогональных составляющих векторов скоростей ОКА и СКА в момент времени t_0 по предлагаемому методу.

3. Описание разработанного метода

Разработанный МКМ двух КА с использованием ЗС включает:

- алгоритм оценки координат ОКА и СКА;
- алгоритм оценки ортогональных составляющих векторов скоростей ОКА и СКА.

Алгоритм оценки координат ОКА x_1, y_1, z_1 и СКА x_2, y_2, z_2 в момент времени t_0 с использованием ЗС I_n , где $n = 1...N$ — номер ЗС, $N \geq 6$, размещенных на позициях с известными координатами $x_{I_n}, y_{I_n}, z_{I_n}$, основан на том, что каждой из временных задержек Δt_n соответствует разности длин $R_{I_n S_1 K}$ и $R_{I_n S_2 K}$ траекторий $I_n S_1 K$ и $I_n S_2 K$ далее обозначаемые как ΔR_n .

$$\Delta R_n = \Delta t_n c \quad (1)$$

где $c \approx 3 \times 10^8$ м/с — скорость света в вакууме.

Для оценки координат ОКА x_1, y_1, z_1 и СКА x_2, y_2, z_2 с использованием шести ЗС разработан алгоритм, этапы которого представлена ниже.

На этапе 1 производят ввод исходных данных, в качестве которых выступают: момент времени измерения t_0 ; координаты ПРТС x_K, y_K, z_K ; координаты шести ЗС $x_{I_n}, y_{I_n}, z_{I_n}$; временные задержки между радиосигналами принятыми от ОКА и СКА для каждой из выбранных ЗС Δt_n ; пороги точности δ_1 и δ_2 расчета координат ОКА и СКА соответственно.

На этапе 2 рассчитывают разности длин ΔR_n траекторий $I_n S_1 K$ и $I_n S_2 K$ по формулам (1).

На этапе 3 выбирают, на основе элементов Кеплеровой орбиты ОКА и СКА, координаты опорных точек $S'_1(x'_1, y'_1, z'_1)$ и $S'_2(x'_2, y'_2, z'_2)$, как первые приближения к координатам ОКА и СКА.

На этапе 4 рассчитывают разности длин $\Delta R'_n$ траекторий $I_n S'_1 K$ и $I_n S'_2 K$, при условии равенства координат ОКА и СКА координатам опорных точек $S'_1(x'_1, y'_1, z'_1)$ и $S'_2(x'_2, y'_2, z'_2)$ по формулам:

$$\Delta R'_n = R_{I_n S'_1 K} - R_{I_n S'_2 K} = R_{S'_1 I_n} + R_{S'_1 K} - (R_{S'_2 I_n} + R_{S'_2 K}) \quad (2)$$

где $R_{S'_1 I_n}$ — расстояния от опорной точки S'_1 до n -й ЗС I_n , $R_{S'_1 K}$ — расстояние от опорной точки S'_1 до ПРТС K , $R_{S'_2 I_n}$ — расстояния от опорной точки S'_2

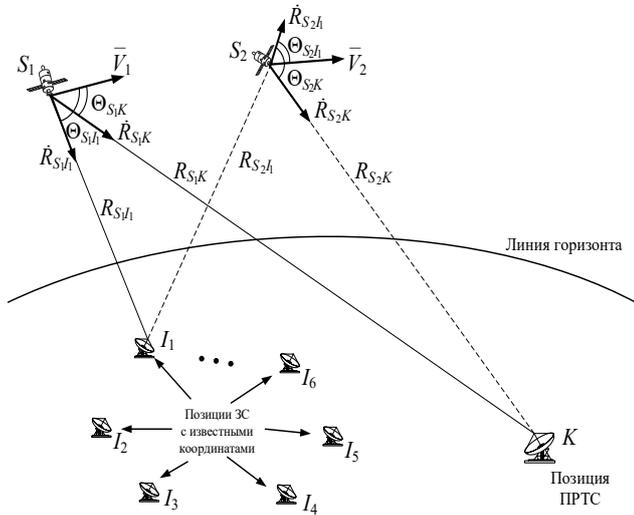


Рис. 1. Геометрическая основа разработанной АИМ КМ

На рис. 1 введены следующие обозначения: $R_{S_1 I_1}$ — расстояние между ОКА S_1 и первой ЗС I_1 ; $R_{S_1 K}$ — расстояние между ОКА S_1 и ПРТС K ; $R_{S_2 I_1}$ — расстояние между СКА S_2 и первой ЗС I_1 ; $R_{S_2 K}$ — расстояние между СКА S_2 и ПРТС K ; $\dot{R}_{S_1 K}$ — радиальная скорость ОКА S_1 в направлении ПРТС K , $\dot{R}_{S_2 I_1}$ — радиальная скорость СКА S_2 в направлении первой ЗС I_1 , $\dot{R}_{S_2 K}$ — радиальная скорость СКА S_2 в направлении ПРТС K , \vec{V}_1 и \vec{V}_2 — векторы скорости ОКА и СКА соответственно, $\Theta_{S_1 K}$ и $\Theta_{S_2 K}$ — углы между направлением на ПРТС и векторами \vec{V}_1 и \vec{V}_2 соответственно; $\Theta_{S_1 I_1}$ и $\Theta_{S_1 I_2}$ — углы между направлениями на первую ЗС и векторами \vec{V}_1 и \vec{V}_2 соответственно.

Для каждой n -й ЗС возможно ввести обозначения: $R_{S_1 I_n}$ — расстояния между ОКА S_1 и n -й ЗС I_n ; $R_{S_2 I_n}$ — расстояния между СКА S_2 и n -й ЗС I_n ; $\dot{R}_{S_1 I_n}$ — радиальные скорости ОКА S_1 в направлении n -ю ЗС I_n , $\dot{R}_{S_2 I_n}$ — радиальные скорости СКА S_2 в направлении n -ю ЗС I_n , $\Theta_{S_1 I_n}$ и $\Theta_{S_1 I_n}$ — углы между направлениями на n -ю ЗС и векторами \vec{V}_1 и \vec{V}_2 соответственно.

На рис. 1 представлено шесть ЗС, как минимально необходимое количество ЗС для однозначной одномоментной оценки координат и ор-

до n -й ЗС I_n , $R_{S'K}$ — расстояние от опорной точки S^2 до ПРТС K .

Расстояния $R_{S'I_n}$, $R_{S'K}$, $R_{S'I_n}$ и $R_{S'K}$ в свою очередь рассчитывают по формулам:

$$R_{S'I_n} = \sqrt{(x'_i - x_{I_n})^2 + (y'_i - y_{I_n})^2 + (z'_i - z_{I_n})^2}, \quad R_{S'K} = \sqrt{(x'_i - x_K)^2 + (y'_i - y_K)^2 + (z'_i - z_K)^2},$$

$$R_{S'I_n} = \sqrt{(x'_i - x_{I_n})^2 + (y'_i - y_{I_n})^2 + (z'_i - z_{I_n})^2}, \quad R_{S'K} = \sqrt{(x'_i - x_K)^2 + (y'_i - y_K)^2 + (z'_i - z_K)^2}.$$

На этапе 5 рассчитывают невязки k_n как разницы между определенными на этапе 4 разностями длин $\Delta R'_n$ траекторий $I_n S_1 K$ и $I_n S_2 K$, и разностями длин ΔR_n траекторий $I_n S_1 K$ и $I_n S_2 K$, определенными на этапе 2 соответственно:

$$k_n = \Delta R'_n - \Delta R_n.$$

На этапе 6 оценивают поправки к координатам ОКА Δx_1 , Δy_1 , Δz_1 и СКА Δx_2 , Δy_2 , Δz_2 .

Для оценки поправок к координатам ОКА Δx_1 , Δy_1 , Δz_1 и СКА Δx_2 , Δy_2 , Δz_2 предварительно формируют систему линейных уравнений при разложении в ряд Тейлора функций $\Delta R'_n$, с точностью до первых членов:

$$\begin{cases} \frac{\partial \Delta R'_n}{\partial x_1} \Delta x_1 + \frac{\partial \Delta R'_n}{\partial y_1} \Delta y_1 + \frac{\partial \Delta R'_n}{\partial z_1} \Delta z_1 + \frac{\partial \Delta R'_n}{\partial x_2} \Delta x_2 + \frac{\partial \Delta R'_n}{\partial y_2} \Delta y_2 + \frac{\partial \Delta R'_n}{\partial z_2} \Delta z_2 = k_n, \\ n = 1..6, \end{cases} \quad (3)$$

где частные производные рассчитываются согласно выражениям:

$$\frac{\partial \Delta R'_n}{\partial x_1} = \frac{x'_1 - x_{I_n}}{R_{S'_1 I_n}} + \frac{x'_1 - x_K}{R_{S'_1 K}}, \quad \frac{\partial \Delta R'_n}{\partial y_1} = \frac{y'_1 - y_{I_n}}{R_{S'_1 I_n}} + \frac{y'_1 - y_K}{R_{S'_1 K}}, \quad \frac{\partial \Delta R'_n}{\partial z_1} = \frac{z'_1 - z_{I_n}}{R_{S'_1 I_n}} - \frac{z'_1 - z_K}{R_{S'_1 K}},$$

$$\frac{\partial \Delta R'_n}{\partial x_2} = -\frac{x'_2 - x_{I_n}}{R_{S'_2 I_n}} - \frac{x'_2 - x_K}{R_{S'_2 K}}, \quad \frac{\partial \Delta R'_n}{\partial y_2} = -\frac{y'_2 - y_{I_n}}{R_{S'_2 I_n}} - \frac{y'_2 - y_K}{R_{S'_2 K}}, \quad \frac{\partial \Delta R'_n}{\partial z_2} = \frac{z'_2 - z_{I_n}}{R_{S'_2 I_n}} - \frac{z'_2 - z_K}{R_{S'_2 K}}.$$

Решая систему линейных уравнений (3) одним из известных методов, например, методом Крамера, получают поправки к координатам ОКА Δx_1 , Δy_1 , Δz_1 и СКА Δx_2 , Δy_2 , Δz_2 .

На этапе 7 рассчитывают координаты новых опорных точек x''_1 , y''_1 , z''_1 и x''_2 , y''_2 , z''_2 :

$$x''_1 = x'_1 + \Delta x_1, \quad y''_1 = y'_1 + \Delta y_1, \quad z''_1 = z'_1 + \Delta z_1, \quad x''_2 = x'_2 + \Delta x_2, \quad y''_2 = y'_2 + \Delta y_2, \quad z''_2 = z'_2 + \Delta z_2.$$

Этапы 4–7 в совокупности составляют первую итерацию. Далее итерации повторяют, используя каждый раз новые опорные точки, полученные на предыдущей итерации. Количество необходимых итераций зависит требуемой точности определения координат ОКА и СКА. С точностью оценки координат КА напрямую связан величинами шагов итераций для ОКА и СКА d_1 и d_2 .

На этапе 8 определяют шаги итерации d_1 и d_2 как расстояния между текущими и предыдущими опорными точками:

$$d_1 = \sqrt{(x''_1 - x'_1)^2 + (y''_1 - y'_1)^2 + (z''_1 - z'_1)^2}, \quad d_2 = \sqrt{(x''_2 - x'_2)^2 + (y''_2 - y'_2)^2 + (z''_2 - z'_2)^2}$$

На этапе 8 сравнивают d_1 и d_2 с порогами

δ_1 и δ_2 , задаваемым на этапе 1.

Необходимое число итераций, как правило, составляет 2...4. В качестве координат ОКА и СКА x_1 , y_1 , z_1 и x_2 , y_2 , z_2 выбирают значения координат опорных точек на последней итерации, вывод которых осуществляют на этапе 10.

Для оценки ортогональных составляющих векторов скоростей ОКА \dot{x}_1 , \dot{y}_1 , \dot{z}_1 и СКА \dot{x}_2 , \dot{y}_2 , \dot{z}_2 в момент времени t_0 возможно использовать ПРТС K , а также не менее шести выбранных ЗС I_n , (см. рисунок 1), размещенных на позициях с известными координатами x_{I_n} , y_{I_n} , z_{I_n} , излучающие радиосигналы на известных частотах f_n в направлении ОКА и СКА.

В качестве примера в настоящем приложении представлен вариант с шестью ЗС ($n = 1..6$) как минимально необходимого количества ЗС для однозначного одномоментного определения векторов скоростей ОКА \dot{x}_1 , \dot{y}_1 , \dot{z}_1 и СКА \dot{x}_2 , \dot{y}_2 , \dot{z}_2 . Предполагается, что координаты ОКА x_1 , y_1 , z_1 и СКА x_2 , y_2 , z_2 в момент времени t_0 — рассчитаны в соответствии с алгоритмом, представленном выше.

С помощью корреляционной обработки радиосигналов в ПРТС K измеряют значения номиналов частот $f_{I_n S_1 K}$ и $f_{I_n S_2 K}$ принятых радиосигналов n -х ЗС I_n после их ретрансляции ОКА и СКА соответственно.

Для номиналов частот $f_{I_n S_1 K}$ и $f_{I_n S_2 K}$ справедливы аналитические выражения:

$$f_{I_n S_1 K} = f_n + f_{D_{I_n S_1}} + f_{G_1} + f_{D_{I_n S_1 K}}, \quad (4)$$

$$f_{I_n S_2 K} = f_n + f_{D_{I_n S_2}} + f_{G_2} + f_{D_{I_n S_2 K}}, \quad (5)$$

где f_n — значения номиналов частот излучаемых каждой n -й ЗС I_n ; $f_{D_{I_n S_1}}$ и $f_{D_{I_n S_2}}$ — доплеровские сдвиги частот на входе ОКА и СКА соответственно за счет его сближения (удаления) с (n -й ЗС I_n); f_{G_1} и f_{G_2} — заданные частоты сдвига рабочих частот ОКА и СКА соответственно; $f_{D_{I_n S_1 K}}$ и $f_{D_{I_n S_2 K}}$ — доплеровские сдвиги частот на выходе ОКА и СКА соответственно за счет его сближения (удаления) с (n -й ПРТС K).

Предполагают, что нестабильность генератора частот КА известна и компенсируется. Влияние других эффектов на изменение частоты, например, гравитационный и релятивистский эффекты в рамках рассматриваемой задачи, пренебрежимо мало и поэтому не учитывают.

Для расчета ортогональных составляющих векторов скоростей ОКА \dot{x}_1 , \dot{y}_1 , \dot{z}_1 и СКА \dot{x}_2 , \dot{y}_2 , \dot{z}_2 с использованием шести ЗС разработан алгоритм, этапы которого представлены ниже.

На этапе 1 производят ввод исходных дан-

ных, в качестве которых выступают: момент времени измерения t_0 ; координаты ПРТС x_K, y_K, z_K ; координаты ОКА x_1, y_1, z_1 и СКА x_2, y_2, z_2 в момент времени t_0 ; координаты шести ЗС $x_{I_n}, y_{I_n}, z_{I_n}$; значения частот сдвига рабочих частот f_{G1} и f_{G2} ОКА и СКА соответственно; значения номиналов частот излучаемых каждой n -й ЗС f_n ; значения номиналов частот $f_{I_n S_1 K}$ и $f_{I_n S_2 K}$ принятых радиосигналов n -х ЗС I_n после их ретрансляции ОКА и СКА соответственно.

На этапе 2 рассчитывают расстояния $R_{S_1 K}$ и $R_{S_1 I_n}$ от и n -х ЗС I_n и ПРТС K до ОКА S_1 по формулам:

$$R_{S_1 K} = \sqrt{(x_1 - x_K)^2 + (y_1 - y_K)^2 + (z_1 - z_K)^2}, \quad (6)$$

$$R_{S_1 I_n} = \sqrt{(x_1 - x_{I_n})^2 + (y_1 - y_{I_n})^2 + (z_1 - z_{I_n})^2}. \quad (7)$$

На этапе 3 рассчитывают расстояния $R_{S_2 K}$ и $R_{S_2 I_n}$ от и n -х ЗС I_n и ПРТС K до СКА S_2 по формулам:

$$R_{S_2 K} = \sqrt{(x_2 - x_K)^2 + (y_2 - y_K)^2 + (z_2 - z_K)^2}, \quad (8)$$

$$R_{S_2 I_n} = \sqrt{(x_2 - x_{I_n})^2 + (y_2 - y_{I_n})^2 + (z_2 - z_{I_n})^2}. \quad (9)$$

На этапе 4 составляют аналитические выражения для радиальных скоростей $\dot{R}_{S_1 I_n}$ и $\dot{R}_{S_1 K}$ ОКА S_1 относительно каждой из n -й ЗС I_n и ПРТС K соответственно.

Для значений радиальных скоростей $\dot{R}_{S_1 I_n}$ и $\dot{R}_{S_1 K}$ ОКА S_1 возможно записать формулы:

$$\dot{R}_{S_1 I_n} = |\vec{V}_2| \cos \Theta_{S_1 I_n}, \quad (10)$$

$$\dot{R}_{S_1 K} = |\vec{V}_1| \cos \Theta_{S_1 K}, \quad (11)$$

Согласно теореме о скалярном произведении векторов [6] справедливы равенства:

$$\cos \Theta_{S_1 I_n} = \frac{(x_1 - x_{I_n})\dot{x}_1 + (y_1 - y_{I_n})\dot{y}_1 + (z_1 - z_{I_n})\dot{z}_1}{\sqrt{(x_1 - x_{I_n})^2 + (y_1 - y_{I_n})^2 + (z_1 - z_{I_n})^2} \sqrt{\dot{x}_1^2 + \dot{y}_1^2 + \dot{z}_1^2}} \quad (12)$$

$$\cos \Theta_{S_1 K} = \frac{(x_1 - x_K)\dot{x}_1 + (y_1 - y_K)\dot{y}_1 + (z_1 - z_K)\dot{z}_1}{\sqrt{(x_1 - x_K)^2 + (y_1 - y_K)^2 + (z_1 - z_K)^2} \sqrt{\dot{x}_1^2 + \dot{y}_1^2 + \dot{z}_1^2}} \quad (13)$$

Модуль вектора скорости ОКА $|\vec{V}_1|$ равен:

$$|\vec{V}_1| = \sqrt{\dot{x}_1^2 + \dot{y}_1^2 + \dot{z}_1^2}. \quad (14)$$

Уравнения (10) и (11) с учетом (6), (7), (12)... (14) преобразуют к виду:

$$\dot{R}_{S_1 I_n} = \frac{(x_1 - x_{I_n})\dot{x}_1 + (y_1 - y_{I_n})\dot{y}_1 + (z_1 - z_{I_n})\dot{z}_1}{R_{S_1 I_n}}, \quad (15)$$

$$\dot{R}_{S_1 K} = \frac{(x_1 - x_K)\dot{x}_1 + (y_1 - y_K)\dot{y}_1 + (z_1 - z_K)\dot{z}_1}{R_{S_1 K}}. \quad (16)$$

На этапе 5 составляют аналитические выражения для радиальных скоростей $\dot{R}_{S_2 I_n}$ и $\dot{R}_{S_2 K}$ СКА S_2 относительно каждой из n -й ЗС I_n и ПРТС K соответственно.

Для значений $\dot{R}_{S_2 I_n}$ и $\dot{R}_{S_2 K}$ СКА S_2 возможно записать формулы:

$$\dot{R}_{S_2 I_n} = |\vec{V}_2| \cos \Theta_{S_2 I_n}, \quad (17)$$

$$\dot{R}_{S_2 K} = |\vec{V}_2| \cos \Theta_{S_2 K}, \quad (18)$$

Согласно теореме о скалярном произведении векторов [6]:

$$\cos \Theta_{S_2 I_n} = \frac{(x_2 - x_{I_n})\dot{x}_2 + (y_2 - y_{I_n})\dot{y}_2 + (z_2 - z_{I_n})\dot{z}_2}{\sqrt{(x_2 - x_{I_n})^2 + (y_2 - y_{I_n})^2 + (z_2 - z_{I_n})^2} \sqrt{\dot{x}_2^2 + \dot{y}_2^2 + \dot{z}_2^2}} \quad (19)$$

$$\cos \Theta_{S_2 K} = \frac{(x_2 - x_K)\dot{x}_2 + (y_2 - y_K)\dot{y}_2 + (z_2 - z_K)\dot{z}_2}{\sqrt{(x_2 - x_K)^2 + (y_2 - y_K)^2 + (z_2 - z_K)^2} \sqrt{\dot{x}_2^2 + \dot{y}_2^2 + \dot{z}_2^2}} \quad (20)$$

Модуль вектора скорости СКА $|\vec{V}_2|$ равен:

$$|\vec{V}_2| = \sqrt{\dot{x}_2^2 + \dot{y}_2^2 + \dot{z}_2^2}. \quad (21)$$

Уравнения (17) и (18) с учетом (8), (9), (19)... (21) преобразуют к виду:

$$\dot{R}_{S_2 I_n} = \frac{(x_2 - x_{I_n})\dot{x}_2 + (y_2 - y_{I_n})\dot{y}_2 + (z_2 - z_{I_n})\dot{z}_2}{R_{S_2 I_n}}, \quad (22)$$

$$\dot{R}_{S_2 K} = \frac{(x_2 - x_K)\dot{x}_2 + (y_2 - y_K)\dot{y}_2 + (z_2 - z_K)\dot{z}_2}{R_{S_2 K}}. \quad (23)$$

На этапе 6 вычисляют значения разностей частот Δf_n , между принятыми радиосигналами от каждой из n -й ЗС I_n после их ретрансляции ОКА и СКА соответственно по формулам:

$$\Delta f_n = f_{I_n S_1 K} - f_{I_n S_2 K} \quad (24)$$

На этапе 7 вычисляют ортогональные составляющие векторов скоростей ОКА $\dot{x}_1, \dot{y}_1, \dot{z}_1$ и СКА $\dot{x}_2, \dot{y}_2, \dot{z}_2$.

Для значений разностей частот Δf_n , между принятыми радиосигналами от каждой из n -й ЗС I_n после их ретрансляции ОКА и СКА с учетом (4), (5) и (24) возможно составить выражения:

$$\Delta f_n = f_{D_{I_n S_1}} + f_{G_1} + f_{D_{I_n S_1 K}} - (f_{D_{I_n S_2}} + f_{G_2} + f_{D_{I_n S_2 K}}) \quad (25)$$

Доплеровские сдвиги частот на входе $f_{D_{I_n S_1}}$ и на выходе $f_{D_{I_n S_1 K}}$ ОКА S_1 за счет его сближения (удаления) с (от) n -й ЗС I_n и ПРТС K возможно представить в виде:

$$f_{D_{I_n S_1}} = f_n \frac{\dot{R}_{S_1 I_n}}{c}, \quad (26)$$

$$f_{D_{I_n S_1 K}} \approx (f_n + f_{G_1}) \frac{\dot{R}_{S_1 K}}{c}. \quad (27)$$

Доплеровские сдвиги частот на входе $f_{D_{I_n S_2}}$ и на выходе $f_{D_{I_n S_2 K}}$ СКА S_2 за счет его сближения (удаления) с (от) n -й ЗС I_n и ПРТС K возможно представить в виде:

$$f_{D_{I_n S_2}} = f_n \frac{\dot{R}_{S_2 I_n}}{c}, \quad (28)$$

$$f_{D_{inS_2K}} \approx (f_n + f_{G_2}) \frac{\dot{R}_{S_2K}}{c}. \quad (29)$$

Выражения (25) с учетом уравнений (26)... (29) для частного случая, когда $n = 1 \dots 6$, преобразуют в систему линейных уравнений:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 A_{n1} + \dot{y}_1 A_{n2} + \dot{z}_1 A_{n3} + \dot{x}_2 A_{n4} + \dot{y}_2 A_{n5} + \dot{z}_2 A_{n6} = B_n; \\ n=1 \dots 6, \end{cases} \quad (30)$$

где коэффициенты при переменных и свободные члены равны:

$$\begin{aligned} A_{n1} &= \frac{(x_1 - x_{I_n})f_n}{R_{S_1I_n}} + \frac{(x_1 - x_K)(f_n + f_{G_1})}{R_{S_1K}}, & A_{n2} &= \frac{(y_1 - y_{I_n})f_n}{R_{S_1I_n}} + \frac{(y_1 - y_K)(f_n + f_{G_1})}{R_{S_1K}}, \\ A_{n3} &= \frac{(z_1 - z_{I_n})f_n}{R_{S_1I_n}} + \frac{(z_1 - z_K)(f_n + f_{G_1})}{R_{S_1K}}, & A_{n4} &= -\frac{(x_2 - x_{I_n})f_n}{R_{S_2I_n}} - \frac{(x_2 - x_K)(f_n + f_{G_2})}{R_{S_2K}}, \\ A_{n5} &= -\frac{(y_2 - y_{I_n})f_n}{R_{S_2I_n}} - \frac{(y_2 - y_K)(f_n + f_{G_2})}{R_{S_2K}}, & A_{n6} &= -\frac{(z_2 - z_{I_n})f_n}{R_{S_2I_n}} - \frac{(z_2 - z_K)(f_n + f_{G_2})}{R_{S_2K}}, \\ & & B_n &= (\Delta f_n - f_{G_1} + f_{G_2})c. \end{aligned}$$

Систему из шести линейных уравнений с шестью неизвестными (30) решают одним из известных методов, например, методом Крамера. Результатом решения системы уравнений (30) выступают ортогональные составляющие векто-

ров скоростей ОКА $\dot{x}_1, \dot{y}_1, \dot{z}_1$ и СКА $\dot{x}_2, \dot{y}_2, \dot{z}_2$ в момент времени t_0 .

На этапе 8 осуществляют вывод результатов, в качестве которых выступают ортогональные составляющие векторов скоростей ОКА $\dot{x}_1, \dot{y}_1, \dot{z}_1$ и СКА $\dot{x}_2, \dot{y}_2, \dot{z}_2$ в момент времени t_0 .

В общем случае, когда количество ЗС $N > 6$, алгоритм определения ортогональных составляющих ОКА $\dot{x}_1, \dot{y}_1, \dot{z}_1$ и СКА $\dot{x}_2, \dot{y}_2, \dot{z}_2$ остается прежним, с той лишь разницей, что система уравнений (30) будет содержать более шести уравнений. Тогда такую систему уравнений решают, например, методом наименьших квадратов.

4. Заключение

Отличительной особенностью предложенной АИМ КМ оценки координат и векторов скоростей двух КА с использованием не менее шести ЗС заключается в том, что одновременно оцениваются координаты и векторы скоростей двух КА. Представленная АИМ КМ может быть использован в образовательном процессе, а также при проектировании и исследовании точностных характеристик комплексов КМ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Simonov A., Fokin G., Sevidov V., Sivers M., Dvornikov S. Polarization direction finding method of interfering radio emission sources. // В сборнике: Internet of Things, Smart Spaces, and Next Generation Networks and Systems. 2019. С. 208-219.
2. Bachevsky S.V., Fokin G.A., Simonov A.N., Sevidov V.V. Positioning of radio emission sources with unmanned aerial vehicles using TDOA-AOA measurement processing. // В сборнике: Journal of Physics: Conference Series. V International Conference on Information Technology and Nanotechnology, ITNT 2019. 2019. С. 042040.
3. Балабанов В.В., Беспалов В.Л., Кельян А.Х., Пономарев А.А., Севидов В.В., Чемаров А.О. Способ определения параметров орбиты искусственного спутника Земли. Патент на изобретение RU 2652603, 27.04.2018. Заявка № 2017121725 от 20.06.2017.
4. Агиевич С.Н., Беспалов В.Л., Ледовская Э.Г., Матюхин А.С., Подъячев П.А., Севидов В.В. Способ определения параметров орбиты искусственного спутника Земли с использованием приемных опорных реперных станций. Патент на изобретение RU 2702098 С1, 04.10.2019. Заявка № 2018127491 от 25.07.2018.
5. Агиевич С.Н., Ватутин В.М., Матюхин А.С., Модин М.И., Севидов В.В. Способ определения параметров орбиты искусственного спутника земли с использованием приемо-передающих опорных реперных станций. Патент на изобретение RU 2708883 С1, 12.12.2019. Заявка № 2018134855 от 01.10.2018.
6. Фокин, Г. А. Использование SDR технологии для задач сетевого позиционирования. Формирование опорных сигналов LTE / Г. А. Фокин, Д. Б. Волгушев, В. Н. Харин // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. – 2022. – Т. 16, № 5. – С. 28–47. – DOI 10.36724/2072-8735-2022-16-5-28-47.
7. Севидов В.В. Программа оценки точности суммарно-дальномерной системы координатометрии, реализующей итерационный способ Ньютона-Рафсона. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ в ФИПС № 2022669541, от 21.10.2022. Заявка № 2022668607 от 12.10.2022.
8. Новые способы пространственного отождествления координатной информации с источниками радиоизлучения в авиационных угломерных системах радиомониторинга / В. И. Меркулов, А. С. Пляшечник, А. Г. Тетеруков, В. С. Чернов // Радиотехника. – 2020. – Т. 84, № 9(17). – С. 5–25. – DOI 10.18127/j00338486-202009(17)-01.
9. Ковалев, Ф. Н. Точность местоопределения цели в бистатической радиолокационной системе / Ф. Н. Ковалев // Успехи современной радиоэлектроники. – 2022. – Т. 76, № 4. – С. 4–7.
10. Dvornikov, S. S. SSB signals with controlled pilot level / S. S. Dvornikov, K. D. Zheglov, S. V. Dvornikov // T-Comm. – 2023. – Vol. 17, No. 3. – P. 41-47. – DOI 10.36724/2072-8735-2023-17-3-41-47. – EDN VUZDRH.