

А. М. Пашаев¹, д-р физ.-мат. наук, ректор, info@naa.baku.az,
А. А. Ализаде², д-р геол.-минер. наук, акад. НАНА, директор, president@science.az,
Т. А. Алиев³, д-р техн. наук, акад. НАНА, директор, telmancyber@rambler.ru,
А. М. Аббасов⁴, д-р техн. наук, акад. НАНА, министр, ali@elm.az,
Г. А. Гулуев³, PhD, зав. лаб., scb_06@mail.ru,
Ф. Г. Пашаев³, PhD, вед. науч. сотр., pasha.farhad@gmail.com,
У. Э. Саттарова³, PhD, ст. науч. сотр., ulker.rzaeva@gmail.com,

¹ Национальная авиационная академия Азербайджана,

² Институт геологии Национальной академии наук Азербайджана,

³ Институт систем управления Академии наук Азербайджана,

⁴ Министерство связи и информационных технологий Азербайджана

Интеллектуальная сейсмоакустическая система выявления зоны очага ожидаемого землетрясения

Проанализированы результаты Noise-технологии мониторинга аномальных сейсмических процессов, проводимых с июля 2010 г. по июнь 2014 г. на девяти сейсмоакустических станциях, построенных на устьях скважин глубиной 10, 200, 300, 1400...5000 м. По результатам экспериментальных данных, полученных в течение более трех лет, создана интеллектуальная система, позволяющая по комбинациям времени изменения оценки взаимокорреляционной функции между полезным сигналом и помехой сейсмоакустической информации, полученной от различных станций за 10...20 ч до землетрясения, выявить местонахождение его зоны. Система в перспективе может быть использована сейсмологами как инструмент при определении местонахождения зоны ожидаемого землетрясения.

Ключевые слова: сейсмический мониторинг, аномальные сейсмические процессы, интеллектуальная сейсмоакустическая система, робастная Noise-технология, обработка сейсмоакустической информации, экспертная система, нейросетевой прогноз зон землетрясения

Введение

В последние годы интенсивно ведутся работы по изучению причин и природы землетрясений [1—3]. Продолжается также изучение возможности получения всевозможной сейсмической информации из глубинных пластов земли [3—7]. К анализу сеймосигналов, получаемых при землетрясениях, применяются такие методы, как вейвлет-преобразование и методы конечных элементов [4, 8—11]. Во всех этих исследованиях проблемы, связанные с прогнозированием землетрясений, остаются основным направлением научно-исследовательских работ [12—24]. Созданы и создаются различные модели и технологии [25—28], разработаны и внедрены многочисленные системы раннего предупреждения населения, модели и технологии быстрого реагирования спасательных сил соответствующих структур [25—28]. Несмотря на вышеупомянутые научно-технические работы в настоящее время землетрясения своевременно не прогнозируются, что приводит к многочисленным катастрофическим последствиям [28—38].

В работах [39—41] предлагается сейсмоакустическая система мониторинга начала процесса подготовки землетрясения. Система состоит из сети девяти сейсмоакустических станций робастного Noise-мониторинга аномальных сейсмических процессов (RNM АСП). В результате экспериментов, проводимых на этих станциях с июля 2010 г., установлено, что при зарождении АСП возникает взаимная корреляционная связь между полезным сигналом и помехой сейсмоакустической информации.

Результат эксплуатации этих станций показал, что каждая из них в отдельности по изменению оценки взаимной корреляционной функции между полезным сигналом и помехой надежно осуществляет индикацию процессов зарождения АСП, предшествующих землетрясению. Однако определение координат ожидаемого землетрясения с достаточной точностью с применением этих станций невозможно. Экспериментальные исследования показали, что имеется возможность создания интеллектуальной системы, которая позволит с помощью этих станций выявить местоположение зоны АСП. Ниже рассматривается один из возможных вариантов создания такой системы.

Постановка задачи

Известно, что в сейсмических регионах, как правило, после определенного промежутка времени T_0 нормального сейсмического состояния в результате зарождения аномальных сейсмических процессов по истечении определенного промежутка времени T_1 происходит землетрясение. Несмотря на различия длительностей времени T_0 , T_1 , задача мониторинга начала времени зарождения АСП сводится к обеспечению надежной индикации начала периода T_1 . Этот вопрос подробно рассмотрен в работах [39–41].

В работе [39] была поставлена задача создания технологии и системы, позволяющей фиксировать момент начала периода времени T_1 . Однако проведенные экспериментальные исследования [39–44] показали, что начало периода T_1 происходит не только при зарождении АСП. Поэтому для мониторинга начала процесса зарождения АСП, кроме регистрации начала периода T_1 , также необходимо осуществить индикацию изменения оценки взаимно корреляционной функции $R_{X\varepsilon}(\mu)$ между полезным сигналом $X(i\Delta t)$ и помехой $\varepsilon(i\Delta t)$.

Поэтому в предлагаемой работе ставится задача применения оценки $R_{X\varepsilon}(\mu)$ сейсмоакустического сигнала $g(i\Delta t)$ как информативного признака для индикации начала зарождения АСП. Для этого в процессе мониторинга необходимо вычислить оценку $R_{X\varepsilon}(\mu)$.

Кроме того, для практического применения сети станций RNM АСП необходимо создание технологии определения местонахождения зоны АСП. Для решения этой задачи сначала рассмотрим возможность применения существующих методик вычисления эпицентра землетрясений [19–28, 46–48] на основе сейсмоинформации, полученной с помощью сети стандартных наземных сейсмостанций.

Известно [19–28, 46–48], что в этих случаях для определения эпицентра землетрясений используют разницу времен достижения основными сейсмическими волнами P (первичными) и S (вторичными) наземных сейсмических станций. Скорость распространения волн P выше, чем скорость распространения S волн. В гомогенной изотропной среде скорость волн P определяется выражением

$$v_P = \sqrt{k + \frac{4}{3}\mu} \quad (1)$$

где k — объемный коэффициент; μ — модуль сдвига; ρ — плотность материала, через который проходят волны.

Скорость распространения волн S можно определить по формуле

$$v_S = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} \quad (2)$$

где μ — модуль сдвига; ρ — плотность материала, через который проходят волны. Расстояние от обыч-

ной наземной сейсмической станции до эпицентра находится умножением разности времени на разность скоростей:

$$S = \Delta T(v_P - v_S). \quad (3)$$

После определения расстояния между эпицентром и различными сейсмостанциями координаты эпицентра определяются геометрическим способом. Однако, к сожалению, во всех известных случаях в системах сейсмического мониторинга координаты эпицентров и гипоцентров определяются только после землетрясений [19–28].

Экспериментальные исследования показали, что в силу многих причин по полученным результатам на станциях RNM АСП вычисления координаты зоны АСП с применением указанной технологии практически невозможно.

В настоящей работе ставится задача создания интеллектуальной системы как для мониторинга зарождения АСП и выявления местонахождения зоны, так и для определения ориентировочного значения магнитуды ожидаемого землетрясения.

Технология определения информативных признаков скрытого периода зарождения АСП

Проведенные исследования показали, что при зарождении АСП в момент начала периода T_1 меняются оценки взаимно корреляционной функции $R_{X\varepsilon}(\mu = 0)$ между полезным сигналом $X(i\Delta t)$ и помехой $\varepsilon(i\Delta t)$, дисперсии помехи D_ε и значения помехо-корреляции $R_{X\varepsilon\varepsilon}(\mu = 0)$ [39–41]. Это связано с тем, что в начале периода T_1 помеха $\varepsilon(i\Delta t)$ формируется от влияния происходящих АСП. Поэтому в течение времени T_1 между полезным сигналом $X(i\Delta t)$ и помехой $\varepsilon(i\Delta t)$ возникает корреляция, и оценка $R_{X\varepsilon}(\mu)$ резко увеличивается. По этой причине можно считать, что оценка $R_{X\varepsilon}(\mu)$ является основным информативным признаком, который целесообразно использовать при мониторинге скрытого периода зарождения АСП.

Начиная с 1 июля 2010 г. для регистрации начала скрытого периода зарождения АСП на станциях RNM АСП были применены как традиционные технологии, так и робастные Noise-технологии. При этом с использованием традиционных корреляционных и спектральных технологий не удалось осуществить регистрацию времени T_1 с достаточной достоверностью и надежностью. В то же время при применении робастной Noise-технологии оценки взаимно корреляционной функции $R_{X\varepsilon}(\mu)$, помехо-корреляции $R_{X\varepsilon\varepsilon}(\mu)$ и дисперсии помехи D_ε с началом времени T_1 резко менялись. Это оказалось решающим фактором, позволяющим безошибочно и с достаточной степенью надежности осуществить мониторинг начала зарождения АСП. Поэтому при создании сети станций RNM АСП именно оценки $R_{X\varepsilon}(\mu)$, $R_{X\varepsilon\varepsilon}(\mu)$ и D_ε были выбраны в качестве информативных признаков для решения задачи мониторинга начала возникновения АСП.

В работе [39] предложено выражение для вычисления оценки релейной взаимно корреляционной функции $R_{X\epsilon}^*(\mu = 0)$ между полезным сигналом $X(i\Delta t)$ и его помехой $\epsilon(i\Delta t)$ в следующем виде:

$$R_{X\epsilon}^*(\mu = 0) \approx \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [\text{sgng}(i\Delta t)g(i\Delta t) - 2\text{sgng}(i\Delta t)g((i+1)\Delta t) + \text{sgng}(i\Delta t)g((i+2)\Delta t)], \quad (4)$$

где g — сейсмоакустический сигнал.

Также показано, что, располагая оценками $R_{X\epsilon}^*(\mu = 0)$, $R_{gg}^*(\mu = 1)$, $R_{gg}(\mu = 1)$ и используя равенство между соотношениями $R_{gg}^*(\mu = 1)/R_{gg}(\mu = 1)$ и $R_{X\epsilon}^*(\mu = 0)/R_{X\epsilon}(\mu = 0)$:

$$\frac{R_{gg}^*(\mu = 1)}{R_{gg}(\mu = 1)} = \frac{R_{X\epsilon}^*(\mu = 0)}{R_{X\epsilon}(\mu = 0)}, \quad (5)$$

по формуле

$$R_{X\epsilon}(\mu = 0) = \frac{R_{gg}(\mu = 1)R_{X\epsilon}^*(\mu = 0)}{R_{gg}^*(\mu = 1)} \quad (6)$$

можно определить оценку $R_{X\epsilon}(\mu = 0)$.

Эксперименты показали, что для повышения надежности и достоверности результатов мониторинга целесообразно в качестве дополнительных информативных признаков также использовать оценки помехокорреляции $R_{X\epsilon\epsilon}(\mu = 0)$ и дисперсии помехи D_ϵ , которые определяются по следующим выражениям [39–48]:

$$R_{X\epsilon\epsilon}(\mu) = R_{X\epsilon}(\mu) + D_\epsilon = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [g^2(i\Delta t) + g(i\Delta t)g((i+2)\Delta t) - 2g(i\Delta t)g((i+1)\Delta t)], \quad (7)$$

$$D_\epsilon = R_{X\epsilon\epsilon}(\mu = 0) - R_{X\epsilon}(\mu = 0). \quad (8)$$

Таким образом, по формулам (4), (6)–(8) имеется возможность определения оценок $R_{X\epsilon}^*(\mu = 0)$, $R_{X\epsilon}(\mu = 0)$, $R_{X\epsilon\epsilon}(\mu = 0)$ и D_ϵ , с помощью которых можно осуществить мониторинг АСП с достаточной надежностью.

Интеллектуальная технология и система выявления местонахождения зоны зарождения АСП

Известно, что когда АСП достигает критического состояния, происходит землетрясение. Границы зоны и магнитуды землетрясения зависят от структуры и характера напряженно-деформированного состояния горных пород в данном конкретном месте. Деформация, происходящая скачкообразно, вызывает появление упругих волн. Объем деформируемых пород играет важную роль, определяя силу сейсмического толчка и формирование сейсмоакустического шума $g(i\Delta t)$. Каждому основному разрыву предшествует довольно длительное время T_1 подготовки землетрясения. Это время может продолжаться до нескольких десятков часов [39].

Анализ сейсмоакустической информации, полученной с помощью акустических датчиков, установленных на устьях законсервированных нефтяных скважин, показал, что при зарождении АСП распространение сейсмоакустического шума в глубинных пластах Земли на несколько десятков часов T_1 опережает ожидаемые землетрясения [39–41]. Экспериментально установлено, что мониторинг начала времени T_1 с применением технологии, описанной выше, достаточно надежно осуществляется станциями RNM АСП (рис. 1, см. вторую сторону обложки, и рис. 2) [39, 40]. Далее рассматривается возможность создания интеллектуальной технологии определения местонахождения зоны АСП с помощью информации, полученной от станций, построенных в девяти прикаспийских сейсмоактивных регионах, характеристики которых (географические координаты и глубины скважины) представлены в табл. 1.

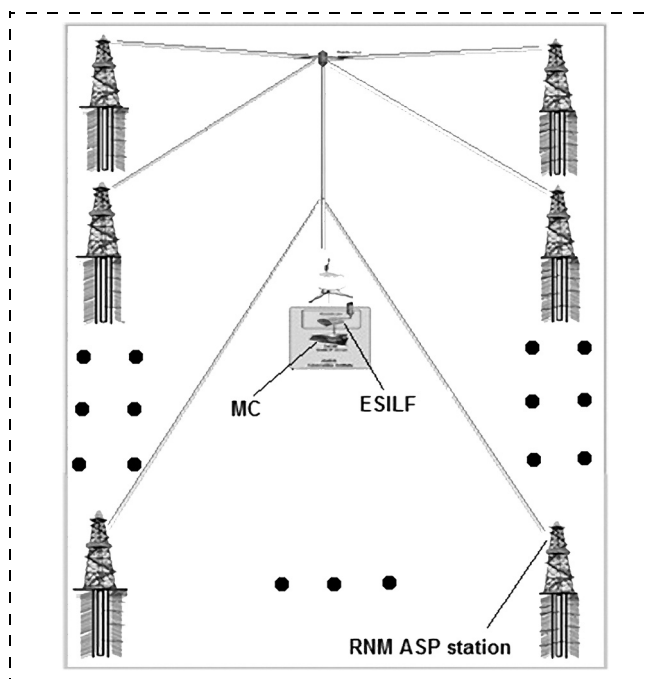


Рис. 2. Интеллектуальная сейсмоакустическая система выявления местонахождения зоны ожидаемого землетрясения

Таблица 1

Характеристики станций RNM АСП

№ пп	Название станции	Координаты станции		Глубина скважины	Начало работы станции
		Широта	Долгота		
1	Гум Адасы	40.310425°	50.008392°	3500 м	Июль 2010
2	Сиазань	41.046217°	49.172058°	3145 м	Ноябрь 2011
3	Нафталан	40.609521°	46.791458°	4000 м	Май 2012
4	Ширван	39.933170°	48.920745°	4900 м	Ноябрь 2011
5	Нефтчала	39.358333°	49.246667°	1430 м	Июнь 2012
6	Нахичеван	39.718000°	44.876000°	1800 м	Март 2013
7	Газах	41.311889°	45.100278°	200 м	Август 2013
8	Туркмен01	38.530089°	56.654472°	300 м	Август 2013
9	Кибернетик (Баку)	40.375700°	49.810833°	10 м	Февраль 2014

Эксперименты, проводимые на станциях RNM АСП, показали, что сейсмоакустические шумы, которые принимаются из глубин Земли гидрофонами, установленными на устьях скважин, являются прямыми и непосредственными предвестниками процесса подготовки землетрясений.

Результаты измерения и анализа этих шумов на каждой станции по спутниковой связи передаются на сервер центра сейсмоакустического мониторинга (ЦМ). В системе также предусмотрена возможность передачи полученных результатов на сервер ЦМ других соседних стран сейсмоактивных регионов.

Начиная с июля 2010 г. для проведения широкомасштабных экспериментов по мониторингу АСП, как это показано на рис. 1, поочередно были введены в эксплуатацию станции RNM АСП Гум Адасы (Каспийское море), Ширван, Сиязань, Нафталан, Нефчала, Нахичевань (на границах Ирана и Турции), Туркмен01 (Туркменистан), Газах (на границе Грузии), Кибернетик (Баку). Последние три станции построены на водяных скважинах глубиной 300, 200 и 10 м соответственно. Станции строятся на тех скважинах, где трубы самотеком заполняются водой. Гидрофоны опускаются на глубину 10...20 м от уровня водяного столба. Анализ сейсмоакустических сигналов, полученных этими станциями, показал, что при зарождении АСП возникают сейсмоакустические шумы, которые распространяются в радиусе более 300...500 км на несколько десятков часов раньше, чем сейсмические волны, которые регистрируются наземными сейсмостанциями.

В процессе функционирования сети станций RNM АСП проводится синхронный робастный Noise-анализ сейсмоакустических сигналов, получаемых от всех станций по спутниковой связи (рис. 2). При этом через каждые 5 с в сервер центра мониторинга от станций передаются оценки Noise-характеристик $R_{\chi\epsilon}(\mu)$, $R_{\chi\epsilon\epsilon}(\mu)$, D_ϵ . По их изменениям, например, для i -й и j -й станции осуществляется индикация начала времени зарождения АСП T_{1i} , T_{1j} .

Результат эксплуатации этих станций показал, что каждая из них в отдельности дает возможность надежно осуществить индикацию процесса зарождения АСП, предшествующих землетрясению [39]. Кроме того, полученные результаты с помощью сети станций RNM АСП открывают возможность создания интеллектуальной технологии выявления местонахождения зоны ожидаемого землетрясения. Для этого сначала с помощью сети этих станций определяются комбинации времени индикации T_{1i} , T_{1j} , которые в сочетании с координатами расположения станций представляют собой исходные данные для решения задачи определения местонахождения зоны АСП. При этом для повышения степени достоверности и надежности полученных результатов, кроме комбинации времени индикации, в качестве исходных данных также целесообразно использовать разности времени $T_{1i} - T_{1j}$ для каждой выбранной пары станций. Другими словами, для решения рассматриваемой задачи в качестве исходных данных,

кроме комбинации T_{1i} , T_{1j} , также целесообразно определять разность времени индикации АСП между станциями, т. е. разности $\Delta\tau_{ij} = T_{1i} - T_{1j}$.

Эксперименты показали, что по значениям оценок Noise-характеристик трудно определить начало времени индикации T_{1i} с достаточной точностью. Поэтому, учитывая важность и необходимость повышения точности его определения, в предлагаемой системе предусмотрено дублирование процесса определения разности времени $\Delta\tau_{ij} = T_{1i} - T_{1j}$. Для этого целесообразно последнюю дополнительно определять по экстремальному значению оценки взаимно корреляционной функции $R_{g_i g_j}(\mu_{\max})$ между сигналами $g_i(i\Delta t)$ и $g_j(i\Delta t)$, получаемыми от различных комбинаций станций RNM АСП по следующим выражениям:

$$R_{g_i g_j}(\mu_{\max}) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N g_i(i\Delta t) g_j(i + \mu)\Delta t, \quad (9)$$

$$R_{g_i g_j}(\mu_{\max}) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N g_i^2(i\Delta t) g_j^2(i + \mu)\Delta t, \quad (10)$$

$$R_{g_i g_j}^*(\mu_{\max}) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N g_i(i\Delta t) g_j^2(i\Delta t). \quad (11)$$

При этом процедура определения разности времени мониторинга между различными станциями в сервере ЦМ заключается в следующем:

- 1) сначала определяется время регистрации начала времени T_{1i} зарождения АСП на первой станции Гум Адасы;
- 2) затем определяются времена мониторинга для второй (Ширван), третьей (Сиязань), четвертой (Нафталан) и т. д. станций;
- 3) далее, по выражениям (9)–(11) определяется множество оценок взаимно корреляционных функций $R_{g_i g_j}(i\Delta t)$, $R_{g_i g_j}^*(i\Delta t)$, из которых выбираются те временные сдвиги $\mu\Delta t$, на которых кривая взаимно корреляционной функции имеет пиковое (экстремальное) значение. По ним определяются разности времени регистрации АСП i -й и j -й станций $\Delta\tau_{ij} = T_{1i} - T_{1j}$;
- 4) найденные временные разности $\Delta\tau_{ij}$ используются как исходные данные при определении зоны местоположения АСП.

Таким образом, в предлагаемой системе оценки Noise-характеристик $R_{\chi\epsilon}(\mu)$, $R_{\chi\epsilon\epsilon}(\mu)$ и D_ϵ , получаемых в результате мониторинга АСП станциями RNM АСП Гум Адасы, Ширван, Сиязань, Нафталан, Нефчала и Нахичевань, Туркмен01 (Туркменистан), Газах и Кибернетик (г. Баку), через спутниковую связь синхронно передаются на сервер ЦМ. По полученным результатам мониторинга формируются как комбинации последовательности времен индикации T_{1i} , T_{1j} , так и комбинации разности времен $\Delta\tau_{ij}$, которые используются как исходные данные для определения местонахождения ожидаемого землетрясения.

Эксперименты, проводимые в июне—июле 2010 г. на указанных станциях, показали, что в Азербайджане и близлежащих регионах в радиусе 300...500 км вокруг сети станций RNM АСП имеются следующие активные зоны землетрясений:

- 1) Туркменская сторона Каспийского моря;
- 2) в Каспийском море южнее Апшеронского полуострова;
- 3) в Каспийском море севернее Апшеронского полуострова;
- 4) в Ширванской зоне Азербайджана;
- 5) в северо-западной зоне Азербайджана;
- 6) в Южной зоне Азербайджана;
- 7) на юге Кавказского региона Российской Федерации;
- 8) на северо-востоке Ирана;
- 9) в северо-западном регионе Ирана (в окрестностях Тебриза);
- 10) на границе Ирана, Ирака и Турции;
- 11) северный регион Ирана;
- 12) восточный регион Турции;
- 13) западная зона Грузии (Черное море).

Некоторые результаты регистрации АСП в этих зонах станциями RNM АСП приведены в работе [39].

В этих зонах в последние полтора—два года произошли многочисленные землетрясения магнитудой более 3...4 баллов. При этом для каждой зоны комбинации последовательности времени регистрации АСП станциями Гум Адасы, Ширван, Сиязань, Нефтчала, Нафталан и Нахичевань практически повторялись. Проведенный анализ записи графиков показал, что каждая комбинация последовательности времени индикации текущих АСП соответствует одному из конкретных очагов землетрясений. Сотрудники, занимающиеся вопросом интерпретации результатов проводимых экспериментов более двух лет, по этим комбинациям времени научились интуитивно, практически безошибочно выявлять местонахождения зоны ожидаемого землетрясения. При этом стала очевидной целесообразность выявления местонахождения зоны ожидаемого землетрясения с помощью экспертных систем. Так естественным образом возникла проблема создания соответствующей экспертной системы, которая позволила бы сейсмологам использовать сеть станций RNM АСП как эффективный инструмент при определении местонахождения зоны ожидаемого землетрясения. Основу предложенного в данной работе экспериментального варианта подобной экспертной системы выявления местонахождения зоны (ЭСВМЗ) АСП составляет база знаний (БЗ), которая сформирована из совокупности множеств $W_1, W_2, W_3, \dots, W_{13}$ местонахождения соответствующих очагов. Элементы каждого из этих множеств сформированы по записям графиков, где, начиная с июля 2010 г. по настоящее время, станциями RNM АСП зарегистрированы параметры всех землетрясений во всех указанных выше тринадцати очагах. Каждый элемент множества $W_i, i = 1, 2, \dots, 13$, состоит из комбинации последовательности времени индикации АСП стан-

циями T_{1i}, T_{1j} , из комбинации разности времен индикации $\Delta\tau_{ij}$, а также из комбинации оценок взаимно корреляционной функции $R_{X\epsilon}(\mu = 0)$. Кроме того, в каждый элемент БЗ также занесена магнитуда M_i , которая была определена при соответствующих землетрясениях наземными сейсмостанциями. Одновременно с этим в каждом элементе отмечена дата землетрясения. Для случая, когда в каждом множестве $W_i, i = 1, 2, \dots, 13$, имеется только один элемент, БЗ имеет следующий вид:

$$W_1 \left\{ \begin{array}{ccccc} T_{11}^1 & T_{12}^1 & \dots & T_{19}^1 & M_1 \\ \Delta\tau_{12}^1 & \Delta\tau_{13}^1 & \dots & \Delta\tau_{19}^1 & M_1 \\ R_{1X\epsilon}^1(\mu = 0) & R_{2X\epsilon}^1(\mu = 0) & \dots & R_{9X\epsilon}^1(\mu = 0) & M_1 \end{array} \right\};$$

$$W_2 \left\{ \begin{array}{ccccc} T_{11}^2 & T_{12}^2 & \dots & T_{19}^2 & M_2 \\ \Delta\tau_{12}^2 & \Delta\tau_{13}^2 & \dots & \Delta\tau_{19}^2 & M_2 \\ R_{1X\epsilon}^2(\mu = 0) & R_{2X\epsilon}^2(\mu = 0) & \dots & R_{9X\epsilon}^2(\mu = 0) & M_2 \end{array} \right\};$$

.....

$$W_{13} \left\{ \begin{array}{ccccc} T_{11}^{13} & T_{12}^{13} & \dots & T_{19}^{13} & M_{13} \\ \Delta\tau_{12}^{13} & \Delta\tau_{13}^{13} & \dots & \Delta\tau_{19}^{13} & M_{13} \\ R_{1X\epsilon}^{13}(\mu = 0) & R_{2X\epsilon}^{13}(\mu = 0) & \dots & R_{9X\epsilon}^{13}(\mu = 0) & M_{13} \end{array} \right\}.$$

Каждое множество $W_i, i = 1, 2, \dots, 13$, экспериментального варианта БЗ состоит из нескольких десятков таких элементов, и при каждом новом землетрясении они дополняются новыми элементами. В процессе эксплуатации экспертной системы (ЭС) по завершении процесса мониторинга и индикации времени начала текущего АСП станциями формируются текущие комбинации последовательности времени индикации T_{1i}, T_{1j} , комбинации разности времен индикации $\Delta\tau_{ij}$. Также формируются комбинации оценок $R_{X\epsilon}(\mu)$.

Начиная с января 2014 г., экспериментальная фаза выявления местонахождения зоны землетрясения проводится с помощью ЭСВМЗ. Этот процесс осуществляется следующим образом. На основе результатов мониторинга на сети станций RNM АСП формируется текущий элемент. Затем на блоке идентификации экспертной системы (БИЭС) он сравнивается со всеми элементами множеств $W_1, W_2, W_3, \dots, W_{13}$. При его совпадении с одним из элементов какого-то множества по его номеру осуществляется идентификация местонахождения зоны ожидаемого землетрясения. В блоке принятия решений (БПР) ЭСВМЗ запоминается номер зоны АСП. Одновременно с этим в это множество БЗ дополнительно вносится текущий элемент. Тем самым, в процессе эксплуатации ЭСВМЗ в БЗ все время записываются новые элементы. Таким образом, сеть станций RNM АСП в сочетании с ЭСВМЗ функционирует как единая система.

В целях проверки достоверности и надежности результатов выявления местонахождения зоны зарождения АСП было проведено испытание описанной ЭСВМЗ при всех последующих землетрясениях. Полученные результаты показали реальную возможность практического применения экспериментального варианта ЭСВМЗ для выявления местонахождения зоны АСП, что создает предпосылки для использования рассматриваемой системы как инструментария при определении местонахождения зоны ожидаемого землетрясения. Принимая во внимание такую перспективу, в перечень основных функций БПР ЭСВМЗ дополнительно была включена функция формирования и представления информации сейсмологам в следующем формате:

1. Дата текущей АСП и номер зоны ожидаемого землетрясения.
2. Результаты текущего мониторинга станциями RNM АСП.
3. Предполагаемый период опережения начала времени мониторинга АСП по сравнению с временем регистрации ожидаемого землетрясения наземными сейсмостанциями.
4. Перечень всех элементов, которые ранее были зарегистрированы в соответствующем множестве при возникновении предыдущих АСП в предполагаемом очаге местонахождения ожидаемого землетрясения (с датами).
5. Число элементов, которые совпадают с текущим.
6. Магнитуды ранее происходивших землетрясений.
7. Минимальная магнитуда ожидаемого землетрясения.
8. В случае отсутствия в БЗ элементов, совпадающих хотя бы с некоторыми элементами в множествах $W_1, W_2, W_3, \dots, W_{13}$, на БПР формируется информация о невозможности выявления зоны землетрясения.

Технология определения приближенного значения магнитуды ожидаемого землетрясения с применением нейронной сети

Анализ результатов эксперимента по определению местонахождения зоны АСП показал, что, зная текущие оценки $R_{X\epsilon}(\mu)$, $R_{X\epsilon\epsilon}(\mu)$, D_ϵ и расстояние от зоны до станций RNM АСП, с применением нейронных сетей можно определить приближенное значение минимальной магнитуды ожидаемого землетрясения. Исследования показали, что для этой цели можно использовать нейронные сети, которые приведены в работах [47, 48]. При этом оказалось, что для обучения нейронной сети целесообразно использовать информацию, содержащуюся в множествах $W_1, W_2, W_3, \dots, W_{13}$. На рис. 3 приведена схема структуры нейронной сети ($N_3 = 1$), которая функционирует следующим образом. Из БЗ содержимые соответствующих элементов множеств $W_1, W_2, W_3, \dots, W_{13}$ поочередно передаются на входы x_1, x_2, \dots, x_{N_1} нейрона, т. е. на входы нейрона поочередно посту-

пают соответствующие комбинации времени индикации АСП T_{1ij} , разности времени индикации Δt_{ij} и оценка $R_{X\epsilon}(\mu = 0)$, на выходе нейрона устанавливается магнитуда M_1 землетрясения, которая была зарегистрирована наземными сейсмостанциями. Процесс обучения проводится последовательно с 1-го по 13-й очаг землетрясения. Например, при обучении нейрона применительно к третьему очагу, т. е. при землетрясении в очаге в Каспийском море, на входы нейрона из БЗ последовательно передаются полученные результаты мониторинга от станций Сиязань, Гум Адасы, Нефтчалы и Копетдаг (Туркменская), а на выходе используется значение магнитуды M_3 . При обучении нейрона для определения магнитуды в 12-м очаге, т. е. в Восточной Турции, на входы нейрона передаются данные мониторинга станций Газах, Нафталан, Ширван и Нахичевань и на выходе используется магнитуда M_{12} . Таким образом, при обучении нейронной сети используются ранее зарегистрированные параметры мониторинга АСП станциями RNM АСП. Одновременно с этим по координатам местонахождения зоны землетрясения в БПР определяются приблизительные расстояния S_1 между станциями и зонами, которые также передаются во входы нейронной сети. В результате нейронная сеть по исходным данным, записанным в элементах множеств $W_1, W_2, W_3, \dots, W_{13}$, и по расстоянию зоны АСП до каждой станции S_1, \dots, S_9 обучается для определения приближенной магнитуды ожидаемого землетрясения. Благодаря этому после этапа обучения в процессе текущего мониторинга АСП с помощью сети станций RNM АСП при передаче на входы нейрона текущих комбинаций соответствующих оценок на выходе y_3 [1] сети формируется код соответствующей приближенной магнитуды M ожидаемого землетрясения. Этот результат передается на вход БПР ЭСВМЗ.

В процессе эксплуатации нейронной сети и экспертной системы каждый раз после выявления ме-

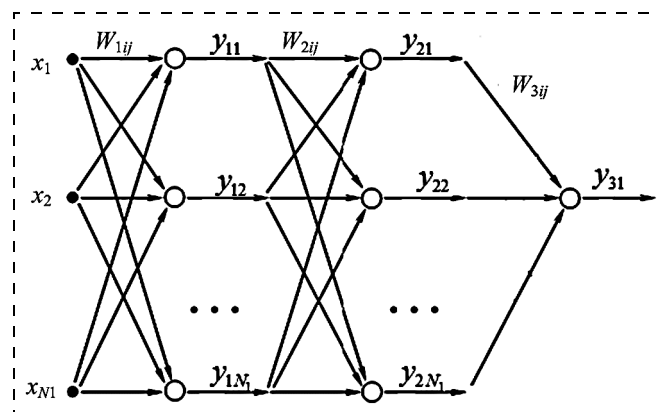


Рис. 3. Структура нейронной сети интеллектуальной сейсмоакустической системы (x_1, x_2, \dots, x_{N_1} — входные значения, W_{1ij} — весовые коэффициенты для первого слоя, W_{2ij} — весовые коэффициенты для второго слоя, W_{3ij} — весовые коэффициенты для третьего слоя, y_{ij} — значений функций активизации)

стонахождения и приблизительной магнитуды каждого ожидаемого землетрясения полученный результат сравнивается с координатами и магнитудами реальных землетрясений, которые регистрируются на наземных сейсмостанциях. Полученная разность в дальнейшем используется как для коррекции БЗ, так и для обучения нейронной сети. Благодаря этому база знаний с течением времени совершенствуется, и степень обучения нейронной сети все время улучшается. В результате появляется возможность повысить надежность, достоверность и адекватность выявления как местонахождения, так и магнитуды ожидаемого землетрясения.

Анализ опыта применения экспертной системы и нейронной сети при определении местонахождения зоны ожидаемого землетрясения показал, что для повышения надежности и достоверности полученных результатов необходимо увеличение числа станций RNM АСП. Учитывая это, с начала 2013 г. была введена в эксплуатацию станция в Нахичеванской автономной области вблизи границы с Турцией и Ираном (см. рис. 1), а также станция Копетдаг в Туркменистане (см. рис. 1). Кроме того, в июле 2013 г. была построена станция в Казахском районе на границе с Грузией (см. рис. 1) и в Институте кибернетики (г. Баку). Следует отметить, что результаты мониторинга на станции, построенной в подвале Института кибернетики, на глубине скважины 10 метров практически совпадали с показаниями станции Гум Адасы, которая построена на скважине с глубиной 3500 м.

Результаты выявления очагов ожидаемых землетрясений интеллектуальной системой в первом полугодии 2014 г.

Опытные испытания рассматриваемой системы начаты в июне 2014 г. За это время при выявлении зоны некоторые ошибки были обнаружены при землетрясениях менее 2,5...3,5 балла. Кроме того, при сбое в системе электропитания, в системе связи и также при неисправности гидрофона, контроллера и других узлов одновременно на двух—трех станциях RNM АСП также были обнаружены ошибочные результаты выявления зоны ожидаемого землетрясения. В результатах выявления местонахождения зоны ожидаемого землетрясения с мощностью более 5 баллов при нормальном состоянии функционирования всех станций RNM АСП ошибки не были обнаружены.

Перечень очагов местонахождения ожидаемых землетрясений, выявленных интеллектуальной сейсмоакустической системой по заархивированным результатам мониторинга в 2013—2014 гг., занимает много места. Поэтому в табл. 2—4 приводятся результаты 11 выявленных очагов ожидаемых землетрясений с января 2013 г. по июль 2014 г. с магнитудой, превышающей 5 баллов. В табл. 2 представлены данные результатов выявления очагов ожидаемых землетрясений, взятые с сайта Euro-Mediterranean

Seismological Centre по ссылке <http://www.emsc-csem.org/#2>. Здесь приведены: местонахождение, время (UTC — универсальное координированное время), координаты (широта и долгота), магнитуды (в единицах ML, mb, Mw) и глубина эпицентра землетрясений. В табл. 3 приведены значения разности времени индикации АСП между станциями RNM АСП, а в табл. 4 — значения Noise-характеристик начала процесса зарождения АСП. Знак "*" в табл. 3 означает, что данная станция RNM АСП слабо реагировала при зарождении АСП ожидаемого землетрясения, а знак "-" в табл. 4 означает, что значение зарегистрированной оценки $R_{\chi_e}(\mu)$ меньше порогового уровня.

Для иллюстрации на рис. 4 и 5 (см. вторую сторону обложки) представлены записи графиков АСП, которые предшествовали двум из указанных землетрясений (по вертикальной оси на всех рисунках отложена помехокорреляция $R_{\chi_{ee}}(\mu = 0)$, по горизонтальной оси — время).

В первых строках табл. 2—4 приведены результаты выявления зоны очага землетрясения, которое произошло в Грузии 26 марта 2013 г. Здесь временное распределение индикации начала станциями RNM АСП имело следующую последовательность: Siyezen — 04:15; Qum Adasy — 04:30; Shirvan — 06:50; Neftchala — 08:30. Системой выявлено, что это соответствует седьмому очагу ожидаемых землетрясений, причем здесь время опережения до землетрясения составило 8...10 часов.

Во вторых строках табл. 2—4 представлены результаты выявления зоны очага землетрясения, которое произошло в Грузии 27 и 28 мая 2013 г. Здесь станциями RNM АСП (Siyezen, Naftalan, Shirvan и Qum Adasy) более чем за 20 ч до начала землетрясения было зарегистрировано зарождение АСП. На рис. 4 приведены графики АСП, из которых видно, что северные (Siyezen) и северо-западные (Qum Adasy) станции зафиксировали аномалии раньше других. При этом имело место следующее временное распределение индикации начала станциями: Naftalan — 07:30; Siyezen — 09:10; Shirvan — 09:45; Qum Adasy — 11:40. Благодаря этому очаг землетрясения был выявлен системой примерно к 18 ч бакинского времени, что почти на 10...11 ч опередило время регистрации данных землетрясений наземными станциями.

В третьей и четвертой строках табл. 2—4 приведены результаты выявления зоны очага землетрясений, которые произошли 16 октября 2013 г. на юге России. Здесь зарождение АСП имело место на юго-востоке Кавказского региона, что было зарегистрировано станциями RNM АСП в следующей последовательности: Siyezen — 05:30, Qum Adasy — 08:00, Qazax — 10:00, Neftchala — 14:30. На основе этой комбинации временного распределения регистрации системой был выявлен седьмой очаг землетрясения, который соответствует северо-востоку Азербайджана, где действительно в 16—17 ч по Бакинскому времени произошло землетрясение.

Время выявления зоны очага опережало землетрясение примерно на 15 ч.

В пятых строках табл. 2—4 показаны результаты выявления зоны очага землетрясений, которое произошло 21 ноября 2013 г. на границе Иран—Ирак. Здесь, по результатам регистрации станциями RNM АСП: Naxchvan — 08:00; Qum Adasy — 09:00; Neftchala — 08:50, системой выявлен очаг ожидаемого землетрясения на 12 ч с опережением.

В шестых строках табл. 2—4 приведен результат выявления системой 9 января 2014 г. местонахождения зоны очага землетрясения, которое произошло на Caspian Sea, Offshore Azerbaijan, и было зарегистрировано станциями RNM АСП (Turkmen01 — 09:15, Qum Adasu — 09:25, Siyezen — 09:45 и Neftchala — 11:15) за 16 ч до землетрясения.

В седьмых строках табл. 2—4 представлен результат выявления системой очага ожидаемого землетрясения, которое произошло 13 января 2014 г. в Туркменистане. Система по комбинациям последовательности времен индикации станциями RNM АСП (Neftchala — 09:30, Siyezen — 10:45 и Qum Adasy — 11:30) показала местонахождение ожидаемого землетрясения в Туркменистане, т. е. в первом очаге. Время выявления очага ожидаемого землетрясения опережало время его регистрации более чем на 24 ч.

В восьмых строках табл. 2—4 приводятся результаты выявления зоны очага землетрясения, которое произошло 28 января 2014 г. на Западе Ирана. Здесь имела место комбинация времен регистрации станциями RNM АСП (Qum Adasy — 09:45, Shirvan — 07:30, Naxchvan — 04:50 и Neftchala — 11:20), позволившая выявить девятый очаг местонахождения ожидаемого землетрясения.

В девятых строках табл. 2—4 представлены результаты выявления зоны очага землетрясения, которое произошло в Азербайджане 9 и 10 февраля 2014 г. На рис. 5 приведены графики соответствующих АСП, из которых видно, что временное распределение их индикации станциями RNM АСП имеет следующую последовательность: Qum Adasy — 17:45, Shirvan — 12:45, Qazax — 19:00 и Naxchvan — 18:30, что дало возможность системе определить номер зоны очага (4) ожидаемого землетрясения системой с опережением времени регистрации землетрясения на 19 ч.

В десятых строках табл. 2—4 приведены результаты выявления зоны очага землетрясения, которое произошло 6 и 7 июня 2014 г. на Offshr Turkmenistan. В одиннадцатых строках табл. 2—4 приведена информация, соответствующая выявлению местонахождения ожидаемого землетрясения, которое произошло в первом очаге в Азербайджане 29 июня

Таблица 2
Результаты выявленных очагов ожидаемых землетрясений

№	Дата и время землетрясения	Широта и долгота землетрясения	Магнитуды и глубина эпицентра землетрясения	Местонахождение зоны очагов землетрясения
1	2013-03-26 23:35:24.0 UTC	43.219 N 41.637 E	mb 5.1 10 km	Georgia (Sak'art'velo)
2	2013-05-28 00:09:52.0 UTC	43.22 N 41.58 E	mb 5.2 2 km	Georgia (Sak'art'velo)
3	2013-09-17 04:09:14.0 UTC	42.17 N 45.89 E	mb 5.0 10 km	Caucasus Region, Russia
4	2013-09-17 04:09:13.0 UTC	42.13 N 45.80 E	Mw 5.1 2 km	Caucasus Region, Russia
5	2013-11-24 18:05:41.0 UTC	34.06 N 45.52 E	mb 5.6 2 km	Iran-Irag Border
6	2014-01-10 00:45:32.0 UTC	41.77 N 49.31 E	ML 5.0 87 km	Caspian Sea, Offshore Azerbaijan
7	2014-01-14 13:55:02.0 UTC	40.38 N 52.97 E	mb 5.1 50 km	Turkmenistan
8	2014-01-28 23:47:38.0 UTC	32.52 N 49.98 E	ML 5.1 33 km	Western Iran
9	2014-02-10 12:06:48.0 UTC	40.23 N 48.63 E	Mw 5.4 55 km	Azerbaijan
10	2014-06-07 06:05:32.1 UTC	40.32 N 51.55 E	mb 5.6 50 km	Offshr Turkmenistan
11	2014-06-29 17:26:10.4 UTC	41.62 N 46.68 E	mb 5.1 20 km	Azerbaijan

Таблица 3
Значения разности времени индикации АСП между станциями RNM АСП

№	$\Delta\tau_{12}$	$\Delta\tau_{13}$	$\Delta\tau_{14}$	$\Delta\tau_{15}$	$\Delta\tau_{16}$	$\Delta\tau_{17}$	$\Delta\tau_{18}$	$\Delta\tau_{19}$
1	35	-120	—	135	*	—	*	—
2	-115	-150	-250	—	*	—	*	—
3	—	-150	—	390	*	120	*	—
4	—	-150	—	390	*	120	*	—
5	—	*	—	-10	-60	*	*	—
6	—	20	—	110	*	—	-10	—
7	—	-45	*	-120	*	*	—	—
8	-135	—	—	100	-300	—	—	—
9	-300	—	—	—	45	75	—	—
10	145	20	—	-70	—	—	—	120
11	305	-85	—	—	—	315	*	—

Таблица 4
Значения Noise характеристик начала процесса зарождения АСП

№	R_{1X_6}	R_{2X_6}	R_{3X_6}	R_{4X_6}	R_{5X_6}	R_{6X_6}	R_{7X_6}	R_{8X_6}	R_{9X_6}
1	14	15	16	17	18	19	20	21	22
1	300	50	100	—	140	—	—	—	—
2	150	150	160	250	—	—	—	—	—
3	100	—	40	—	80	—	80	—	—
4	100	—	40	—	80	—	80	—	—
5	160	—	—	—	150	250	—	—	—
6	110	—	110	—	110	—	—	40	—
7	160	—	100	—	120	—	—	—	—
8	120	110	—	—	—	180	—	—	—
9	75	130	—	—	—	260	230	—	—
10	80	25	40	—	100	—	—	—	80
11	100	20	120	—	—	—	25	—	—

2014 г. Здесь последовательность индикаций начала аномалий станциями RNM АСП (Siyezen — 00:50, Qum Adasy — 02:15, Shirvan — 07:20, Qazax — 07:30) позволила системе выявить местонахождение зоны очага ожидаемого землетрясения (Азербайджан).

Заключение

1. Интеллектуальная система, сформированная на основе сети сейсмоакустических станций RNM АСП и экспертной системы в сочетании с нейронной сетью, может быть использована как эффективный инструмент для выявления местонахождения зоны очага ожидаемого землетрясения. При этом сейсмологу представляется информация, которая содержит номер зоны очага ожидаемого землетрясения, текущие комбинации параметров АСП, число, перечень, даты и магнитуды аналогичных комбинаций, которые были зарегистрированы в данном очаге при прошлых землетрясениях. Представленная информация позволяет оценивать степень достоверности полученного результата о местонахождении зоны очага ожидаемого землетрясения. Наличие достаточного времени до землетрясения дает возможность, в случае сомнения, привлечь к экспертной оценке других сейсмологов и исключить случайную ошибку.

2. Поскольку предложенная сеть станций RNM АСП построена на скважинах с различными глубинами, то все они имеют различные характеристики. Их трудно учесть как при идентификации и выявлении местонахождения зоны очага ожидаемого землетрясения, так и при определении его магнитуды. Кроме этого, стоимость скважины с увеличением глубины резко возрастает. Например, стоимость бурения скважины глубиной 4000...5000 м составляет 20...30 млн долларов. Поэтому для тех стран, где нет законсервированных нефтяных скважин, построение станций RNM АСП будет проблематично.

В связи с этим, в дальнейшем рекомендуется создание сети станций, построенных на водяных скважинах глубиной 50...100 м. При этом гидрофоны рекомендуется погружать на глубину 10...20 м. Для повышения достоверности и надежности результата определения местонахождения зоны очага ожидаемого землетрясения целесообразно строить сеть из большего числа станций (более 10...15), на скважинах с одинаковой глубиной, расположенных на равных расстояниях. Путем интеграции по спутниковой связи сетей станций RNM АСП стран нескольких соседних сейсмоактивных регионов в перспективе можно повысить степень достоверности и надежность определения координаты местонахождения ожидаемого землетрясения.

3. Эксперименты показали, что с увеличением мощности землетрясения улучшается надежность результатов мониторинга соответствующих АСП и повышается степень достоверности результатов выявления местонахождения зоны очага ожидаемого

землетрясения. При мощности более 5 баллов практически во всех случаях результат выявления местонахождения ожидаемого землетрясения оказался достоверным. При этом оценка взаимно корреляционной функции $R_{X\varepsilon}(\mu)$ между полезным сигналом $X(i\Delta t)$ и помехой $\varepsilon(i\Delta t)$ по мере удаления от зоны очага землетрясения уменьшается. Оценка дисперсии помехи D_ε , наоборот, по мере удаления от зоны очага увеличивается. Соотношение $R_{X\varepsilon}(\mu)/R_{X\varepsilon\varepsilon}(\mu)$ по мере удаления уменьшается, а $D_\varepsilon/R_{X\varepsilon\varepsilon}$ — увеличивается. В различных грунтах, например, в воде, в песке, в глине и т. д., разница скорости распространения сейсмоакустического шума значительно отличается. При этом между глубиной скважин и дальностью радиуса мониторинга АСП имеется корреляционная связь.

4. Эксперименты на станции "Гум Адасы" в Каспийском море показали, что радиус мониторинга этой станции значительно шире, чем станций, которые расположены далеко от Каспийского моря. Другие станции в Сиязане и в Нефгчале, расположенные вблизи Каспийского моря, также имеют относительно других станций больший радиус мониторинга. Практически все сейсмические процессы, которые достигают Каспийского моря, четко регистрируются этими станциями. Следовательно, при создании сетей новых станций надо принимать во внимание, что море является "идеальным проводником" сейсмоакустических шумов, возникающих при зарождении АСП в регионе.

5. По результатам, полученным на основе экспериментальных данных, можно предположить, что время опережения регистрации зарождения АСП сейсмоакустической станцией RNM АСП по сравнению со стандартной сейсмоаппаратурой обусловлено двумя факторами.

Во-первых, сейсмоакустические волны, возникающие в начале зарождения АСП, из-за частотных характеристик некоторых верхних пластов не доходят до поверхности Земли. Это способствует их распространению в глубинных пластах в горизонтальном направлении в виде шума. При этом, когда они достигают стальных труб скважины, сейсмоакустические волны преобразовываются в акустические сигналы и передаются со скоростью звука на поверхность Земли, где улавливаются с помощью гидрофона. В то же время низкочастотные сейсмические волны от сейсмопроцессов ощущаются на поверхности Земли через определенный промежуток времени, когда уже происходит землетрясение. Поэтому они регистрируются сейсμοприемниками стандартной наземной аппаратуры заметно позже.

Во-вторых, применение Noise-технологий путем анализа сейсмоакустического шума при появлении взаимосвязи между полезным сигналом и помехой фиксирует АСП в начале их зарождения. Благодаря этим двум факторам на станциях RNM АСП осуществляется индикация начала зарождения аномалии значительно раньше станций сейсмслужбы.

6. Сейсмоакустические станции мониторинга АСП также могут быть использованы для мониторинга скрытого периода процесса формирования вулканов значительно раньше их извержения. Кроме того, их применение также позволит осуществить мониторинг испытания больших и малых атомных бомб, а также других экспериментов, связанных с производством военной техники в масштабе регионов.

Список литературы

1. Kanamori H., Brodsky E. E. The physics of earthquakes // Reports on progress in physics. 2004. 67. P. 1429–1496.
2. Tothong P., Cornell C. A. An Empirical Ground-Motion Attenuation Relation for Inelastic Spectral Displacement // Bulletin of the Seismological Society of America. 2006. 96. P. 2146–2164.
3. Ghahari F., Jahankhah H., Ghannad M. A. Study on elastic response of structures to near-fault ground motions through record decomposition // Soil dynamics and earthquake engineering. 2010. 30. P. 536–546.
4. Boore D. M., Bommer J. J. Processing of strong-motion accelerograms: needs, options and consequences // Soil Dynamics and Earthquake Engineering. 2005. 25. P. 93–115.
5. Galiana-Merino J. J., Parolai S., Rosa-Herranz J. Seismic wave characterization using complex trace analysis in the stationary wavelet packet domain // Soil Dynamics and Earthquake Engineering. 2011. 31. P. 1565–1578.
6. Yee E., Stewart J. P., Schoenberg F. P. Characterization and utilization of noisy displacement signals from simple shear device using linear and kernel regression methods // Soil Dynamics and Earthquake Engineering. 2011. 31. P. 25–32.
7. Pavlović V. D., Veličković Z. S. Measurement of the seismic waves propagation velocity in the real medium // The scientific journal Facta Universitatis Series: Physics, Chemistry and Technology. 1998. 1. P. 63–73.
8. Wang Y., Lu J., Shi Y., Yang C. PS-wave Q estimation based on the P-wave Q values // Journal of geophysics and engineering. 2009. 39. P. 386–389.
9. Mallat S. G. A Theory of Multiresolution Signal Decomposition: The Wavelet Representation // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. 1989. 11 (7). P. 674–693.
10. Vidakovic B., Lozoya C. B. On time-dependent wavelet denoising // IEEE Transaction on Signal Processing. 1998. V. 46. N. 9. P. 2549–2554.
11. Colak O. H., Destici T. C., Ozen S., Arman H., Cerezci O. Frequency-energy characteristics of local earthquakes using discrete wavelet transform // World Academy of Science, Engineering and Technology. 2006. 20. P. 38–41.
12. Hutton D. V. Fundamentals of finite element analysis. McGraw-Hill, 2004.
13. Kislov K. V., Gravirov V. V. Earthquake Arrival Identification in a Record with Technogenic Noise // Seismic Instruments. 2011. V. 47. N. 1. P. 66–79.
14. Descherevsky A. V., Lukk A. A., Sidorin A. Y., Vstovsky G. V., Timashev S. F. Flicker-noise spectroscopy in earthquake prediction research // Natural Hazards and Earth System Sciences. 2003. 3. P. 159–164.
15. Kossobokov V. G. Testing earthquake prediction methods: the West Pacific short-term forecast of earthquakes with magnitude $M_{wHRV} \geq 5.8$ // Tectono-physics. 2006. 413. P. 25–31.
16. Shebalin P., Keilis-Borok V., Gabrielov A., Zaliapin I., Turcotte D. Short-term earthquake prediction by reverse analysis of lithosphere dynamics // Tectonophysics. 2006. 413. P. 63–75.
17. Larionov I. A., Sherbina A. O., Mishenko M. A. Geoacoustic emissions response on the process of earthquake preparation at different observation points. Bulletin of KRAESC. Earth Sciences. 2005. 6. 108–115.
18. Aliev T. A., Alizada T. A., Abbasov A. A. Method for monitoring the beginning of anomalous seismic process. International Application No PCT/AZ2005/000006, Pub. No WO2006/130933, International Filing Date — December 19, 2005.
19. Aliev T. A., Abbasov A. A., Aliev E. R., Guluev G. A. Method for monitoring and forecasting earthquakes. International Application No PCT/AZ2006/00000, Pub. No WO2007/143799, International Filing Date — June 16, 2006.
20. Алиев Т., Аббасов А., Ализаде А., Етирмишли Г., Гулуев Г., Пашаев Ф. Интеллектуальный мониторинг аномальных сейсмических процессов на острове Песчаный Каспийского моря с использованием робастной помехотехнологии // Мехатроника, автоматизация, управление. 2011. № 5. С. 22–28.
21. Aliev T. A., Abbasov A. M., Quluyev G. A., Pashayev F. H., Sattarova U. E. Technologies and systems for minimization of damage from destructive earthquakes // Seismoforecasting researches carried out in the Azerbaijan territory. 2012. P. 449–464.
22. Aliev T. Noise Technologies for Minimization of Damage Caused by Earthquakes. Germany: Lambert Academic Publishing, 2012.
23. Hashemi M., Alesheikh A. A. A GIS-based earthquake damage assessment and settlement methodology // Soil dynamics and earthquake engineering. 2011. 31. P. 1607–1617.
24. Aliev T. A., Abbasov A. M., Aliev E. R., Guluev G. A. Digital technology and the system for receiving and analyzing the information from deep earth layers for noise—monitoring the technical state of the socially—significant objects // Automatic Control and Computer Sciences. 2007. 41. P. 59–67.
25. Hatzigeorgiou G. D., Beskos D. E. Soil-structure interaction effects on seismic inelastic analysis of 3-D tunnels // Soil Dynamics and Earthquake Engineering. 2010. 30. P. 851–861.
26. Papagiannopoulos G. A., Beskos D. E. On a modal damping identification model for building structures // Archive of Applied Mechanics. 2006. 76. P. 443–463.
27. Papagiannopoulos G. A., Beskos D. E. On a modal damping identification model for non-classically damped structures subjected to earthquakes // Soil Dynamics and Earthquake Engineering. 2009. 29. P. 583–589.
28. Zafarani H., Noorzad A., Ansari A., Bargi K. Stochastic modeling of Iranian earthquakes and estimation of ground motion for future earthquakes in Greater Tehran // Soil Dynamics and Earthquake Engineering. 2009. 29. P. 722–741.
29. Sokolov V. Y., Loh C. H., Wen K. L. Evaluation of hard rock spectral models for the Taiwan region on the basis of the 1999 Chi-Chi earthquake data // Soil Dynamics and Earthquake Engineering. 2003. 23. P. 715–735.
30. Stankiewicz J., Bindi D., Oth A., Parolai S. Designing efficient earthquake early warning systems: case study of Almaty, Kazakhstan // Journal of Seismology. 2013. V. 17, Iss. 4. P. 1125–1137.
31. Rydelek P., Pujol J. Real-Time Seismic Warning with a Two-Station Subarray // Bulletin of the Seismological Society of America. 2004. V. 94, N. 4. P. 1546–1550.
32. Tsuboi S., Saito M., Kikuchi M. Real-time earthquake warning by using broadband P Waveform // Geophysical research letters. 2002. 29. P. 2187–2191.
33. Kanamori H. Real-time seismology and earthquake damage mitigation // Annu. Rev. Earth Planet. Sci. 2005. 33. P. 195–214.
34. Lockwood O. G., Kanamori H. Wavelet analysis of the seismograms of the 2004 Sumatra-Andaman earthquake and its application to tsunami early warning // Geochimistry Geophysics Geosystems, 2006. 7. P. 1–10. URL: <http://www.agu.org/journals/abs/2006/2006GC001272.shtml>
35. Alcik H., Ozel O., Wu Y. M., Ozel N. M., Erdik M. An alternative approach for the Istanbul earthquake early warning system // Soil Dynamics and Earthquake Engineering. 2011. 31. P. 181–187.
36. Wang J. P., Wu Y. M., Lin T. L., Brant L. The uncertainties of a Pd3-PGV onsite earthquake early warning system // Soil dynamics and earthquake engineering. 2012. 36. P. 32–37.
37. Moser P., Moaveni B. Design and Deployment of a Continuous Monitoring System for the Dowling Hall Footbridge // Society for Experimental Mechanics. Experimental Techniques. 2013. 37. P. 15–26.
38. Satriano C., Yih-MinWub, Aldo Zollo, Hiroo Kanamori. Earthquake early warning: Concepts, methods and physical grounds // Soil Dynamics and Earthquake Engineering. 2011. 31. P. 106–118.
39. Aliev T. A., Abbasov A. M., Guluyev Q. A., Pashayev F. H., Sattarova U. E. System of robust noise monitoring of anomalous seismic processes // Soil Dynamics and Earthquake Engineering. 2013.
40. Aliev T. Digital noise monitoring of defect origin. London: Springer-Verlag, 2007.
41. Aliev T. A. Robust Technology with Analysis of Interference in Signal Processing, New York: Kluwer Academic/Plenum Publishers, 2003.

42. Aliev T. A., Guluyev G. A., Pashayev F. H., Sadygov A. B. Noise monitoring technology for objects in transition to the emergency state // *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2012. 27. P. 755–762.
43. Aliev T. A., Alizade A. A., Etirmishli G. D., Guluyev G. A., Pashayev F. G., Rzaev A. G. Intelligent Seismoacoustic System for Monitoring the Beginning of Anomalous Seismic Process // *Seismic Instruments*. 2011. V. 47, N. 1. P. 1–9.
44. Aliev T. A., Abbasov A. M., Mamedova G. G., Guluyev G. A., Pashayev F. G. Technologies for Noise Monitoring of Abnormal Seismic Processes // *Seismic Instruments*. 2013. V. 49, N. 1. P. 64–80.

45. Pujol J. Earthquake location tutorial: a graphical approach and approximate epicentral locations techniques // *Seism. Res. Lett.* 75. 2004. N. 1. P. 63–74.
46. Sambridge M., Gallagher K. Earthquake hypocenter location using genetic algorithms // *Bulletin of the Seismological Society of America*. 1993. V. 83, N. 5. P. 1467–1491.
47. Mehdi Khashei, Mehdi Bijari. An artificial neural network (p, d, q) model for timeseries forecasting // *Expert Systems with Applications*. 2010. 37. P. 479–489.
48. Rojas R. *Neural networks*. Berlin: Springer–Verlag, 1996.

Intelligent Seismic-Acoustic System for Identifying the Location of the Focus of an Expected Earthquake

A. M. Pashayev¹, info@naa.baku.az, A. A. Alizada², president@science.az, T. A. Aliev³, telmancyber@rambler.ru, A. M. Abbasov⁴, ali@elm.az, G. A. Guluyev³, scb06@mail.ru, F. G. Pashayev³, pasha.farhad@gmail.com, U. E. Sattarova³, ulker.rzaeva@gmail.com

¹Azerbaijan National Academy of Aviation, Baku, Az1045, Azerbaijan Republic,

²Azerbaijan National Academy of Sciences, Baku, Az1001, Azerbaijan Republic,

³Institute of Control Systems of the Azerbaijan National Academy of Sciences, Baku, Az1141, Azerbaijan Republic,

⁴Ministry of Communications and High Technologies, Baku, Az1000, Azerbaijan Republic

Corresponding author: Pashayev Farhat G., PhD, Leading Researcher, Institute of Control Systems of the Azerbaijan National Academy of Sciences, Baku, Az1141, Azerbaijan Republic, e-mail: pasha.farhad@gmail.com

Received on November 05, 14

Assested on November 20, 2014

This paper presents a brief review of the state-of-the-art in the field of earthquake study and forecasting. We analyze the principles of the methods for determination of the coordinates of earthquake focuses by means of ground seismic stations. We demonstrate that those methods cannot be used in the system for monitoring of the beginning of the earthquake preparation process (in the network of RNM ASP stations). As we know, the beginning of the earthquake process is accompanied by spreading of noisy seismic-acoustic signals. Theoretically, the system for monitoring of the beginning of the earthquake process is based on the technologies for seismic-acoustic signal processing — Robust Noise Monitoring (RNM). The noise characteristics determined by RNM technologies indicate the beginning of the anomalous seismic processes (ASP) and, consequently, a possibility of ASP monitoring. Considering that the seismic-acoustic signal can be represented as the sum of the useful signal and noise ($g = X + \varepsilon$), we present the technologies for determining noise characteristics. It is demonstrated in the paper that a change in the estimate of the cross-correlation function $R_{X\varepsilon}(\mu = 0)$ between the useful signal $X(i\Delta t)$ and the noise $\varepsilon(i\Delta t)$, noise variance D_ε and the value of noise correlation $R_{X\varepsilon\varepsilon}(\mu = 0)$ determine the beginning of ASP. One RNM ASP station determines the beginning of ASP within a radius of about 500 km. Determination of the location of an expected earthquake requires a network of RNM ASP stations. We analyze the results of the noise technology-based monitoring of the anomalous seismic processes performed from July 2010 to June 2014 by nine seismic-acoustic stations built at the head of 10 m, 200 m, 300 m and 1400–5000 m deep wells. Based on the results of the experimental data obtained in the period covering over three years, an intelligent system has been built, which allows us to identify the location of the zone of an earthquake, using the combinations of time of change in the estimate of the correlation function between the useful signal and the noise of the seismic-acoustic information received from different stations 10–20 hours before the earthquake. In the long term, the system can be used by seismologists as a tool for determination of the location of the zone of an expected earthquake.

Keywords: seismic monitoring, anomalous seismic processes, intelligent seismic-acoustic system, robust noise technology, processing of seismic-acoustic information, expert system, neural network forecasting of earthquake zones

For citation:

Pashayev A. M., Alizada A. A., Aliev T. A., Abbasov A. M., Guluyev G. A., Pashayev F. G., Sattarova U. E. Intelligent Seismic-Acoustic System for Identifying the Location of the Focus of an Expected Earthquake, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2015, vol. 16, no. 3, pp. 147–158.

DOI: 10.17587/mau/16.147-158

References

1. Kanamori H., Brodsky E. E. The physics of earthquakes. *Reports on Progress in Physics*, 2004, vol. 67, pp. 1429–1496.
2. Tothong P., Cornell C. A. An Empirical Ground-Motion Attenuation Relation for Inelastic Spectral Displacement, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2006, vol. 96, pp. 2146–2164.

3. Ghahari F., Jahankhah H., Ghannad M. A. Study on elastic response of structures to near-fault ground motions through record decomposition, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2010, vol. 30, pp. 536–546.

4. Boore D. M., Bommer J. J. Processing of strong-motion accelerograms, needs, options and consequences, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2005, vol. 25, pp. 93–115.

5. Galiana-Merino J. J., Parolai S., Rosa-Herranz J. Seismic wave characterization using complex trace analysis in the stationary wavelet packet domain, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2011, vol. 31, pp. 1565–1578.

6. Yee E., Stewart J. P., Schoenberg F. P. Characterization and utilization of noisy displacement signals from simple shear device using linear and kernel regression methods, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2011, vol. 31, pp. 25–32.

7. **Pavlović V. D., Veličković Z. S.** Measurement of the seismic waves propagation velocity in the real medium. *The scientific journal Facta Universitatis, Series, Physics, Chemistry and Technology*, 1998, vol. 1, pp. 63–73.
8. **Wang Y., Lu J., Shi Y., Yang C.** PS-wave Q estimation based on the P-wave Q values, *Journal of Geophysics and Engineering*, 2009, vol. 39, pp. 386–389.
9. **Mallat S. G.** A Theory of Multiresolution Signal Decomposition, The Wavelet Representation, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, July 1989, vol. 11, iss. 7, pp. 674–693.
10. **Vidakovic B., Lozoya C. B.** On time-dependent wavelet denoising, *IEEE Transaction on Signal Processing*, 1998, vol. 46, no. 9, pp. 2549–2554.
11. **Colak O. H., Destici T. C., Ozen S., Arman H., Cerezci O.** Frequency-energy characteristics of local earthquakes using discrete wavelet transform (DWT), *World Academy of Science, Engineering and Technology*, 2006, vol. 20, 38–41.
12. **Hutton D. V.** Fundamentals of finite element analysis, New York, McGraw-Hill, 2004, pp. 494.
13. **Kislov K. V., Gravirov V. V.** Earthquake Arrival Identification in a Record with Technogenic Noise, *Seismic Instruments*, 2011, vol. 47, no. 1, pp. 66–79.
14. **Descherevsky A. V., Lukk A. A., Sidorin A. Y., Vstovsky G. V., Timashev S. F.** Flicker-noise spectroscopy in earthquake prediction research, *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2003, vol. 3, pp. 159–164.
15. **Kossobokov V. G.** Testing earthquake prediction methods: the West Pacific short-term forecast of earthquakes with magnitude $M_{WHRV} \geq 5.8$, *Tectonophysics*, 2006, vol. 413, pp. 25–31.
16. **Shebalin P., Keilis-Borok V., Gabrielov A., Zaliapin I., Turcotte D.** Short-term earthquake prediction by reverse analysis of lithosphere dynamics, *Tectonophysics*, 2006, vol. 413, pp. 63–75.
17. **Larionov I. A., Sherbina A. O., Mishenko M. A.** *Bulleting of KRAESC. Earth Sciences*, 2005, vol. 6, pp. 108–115.
18. **Aliev T. A., Alizada T. A., Abbasov A. A.** Method for monitoring the beginning of anomalous seismic process, *International Application No PCT/AZ2005/000006*, Pub. No WO2006/130933, *International Filling Date — December 19, 2005*.
19. **Aliev T. A., Abbasov A. A., Aliev E. R., Guluev G. A.** Method for monitoring and forecasting earthquakes, *International Application No PCT/AZ2006/000006*, Pub. No WO2007/143799, *International Filling Date — June 16, 2006*.
20. **Aliev T., Abbasov A., Alizade A., Etirmishli G., Guluev G., Pashaev F.** Intellectual Monitoring of Abnormal Seismic Process at the Gum Island of Caspian Sea with Use Robast Strays'es Technology, (Intelligent monitoring of anomalous seismic processes on the Sandy Island of the Caspian sea with use of robust noise technology), *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2011, no. 5, pp. 22–28. (in Russian)
21. **Aliev T. A., Abbasov A. M., Quluyev G. A., Pashayev F. H., Sattarova U. E.** Technologies and systems for minimization of damage from destructive earthquakes, *Seismoforecasting Researches Carried out in the Azerbaijan Territory*, 2012, pp. 449–464.
22. **Aliev T.** Noise Technologies for Minimization of Damage Caused by Earthquakes, Germany: Lambert Academic Publishing, 2012, 220 p.
23. **Hashemi M., Alesheikh A. A.** A GIS-based earthquake damage assessment and settlement methodology, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2011, vol. 31, pp. 1607–1617.
24. **Aliev T. A., Abbasov A. M., Aliev E. R., Guluev G. A.** Digital technology and the system for receiving and analyzing the information from deep earth layers for noise-monitoring the technical state of the socially-significant objects, *Automatic Control and Computer Sciences*, 2007, vol. 41, pp. 59–67.
25. **Hatzigeorgiou G. D., Beskos D. E.** Soil-structure interaction effects on seismic inelastic analysis of 3-D tunnels, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 2010, vol. 30, pp. 851–861.
26. **Papagiannopoulos G. A., Beskos D. E.** On a modal damping identification model for building structures, *Archive of Applied Mechanics*, 2006, vol. 76, pp. 443–463.
27. **Papagiannopoulos G. A., Beskos D. E.** On a modal damping identification model for non-classically damped structures subjected to earthquakes, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2009, vol. 29, pp. 583–589.
28. **Zafarani H., Noorzad A., Ansari A., Bargi K.** Stochastic modeling of Iranian earthquakes and estimation of ground motion for future earthquakes in Greater Tehran, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2009, vol. 29, pp. 722–741.
29. **Sokolov V. Y., Loh C. H., Wen K. L.** Evaluation of hard rock spectral models for the Taiwan region on the basis of the 1999 Chi-Chi earthquake data, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2003, vol. 23, pp. 715–735.
30. **Stankiewicz J., Bindi D., Oth A., Parolai S.** Designing efficient earthquake early warning systems: case study of Almaty, Kazakhstan, *Journal of Seismology*, October 2013, vol. 17, iss. 4, pp. 1125–1137.
31. **Rydelek P., Pujol J.** Real-Time Seismic Warning with a Two-Station Subarray, *Bulletin of the Seismological Society of America*, August 2004, vol. 94, no. 4, pp. 1546–1550.
32. **Tsuboi S., Saito M., Kikuchi M.** Real-time earthquake warning by using broadband P Waveform, *Geophysical Research Letters*, 2002, vol. 29, 2187–2191.
33. **Kanamori H.** Real-time seismology and earthquake damage mitigation, *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.* 2005, vol. 33, pp. 195–214.
34. **Lockwood O. G., Kanamori H.** Wavelet analysis of the seismograms of the 2004 Sumatra-Andaman earthquake and its application to tsunami early warning, *Geochemistry Geophysics Geosystems*, 2006, vol. 7, 1–10, available at <http://www.agu.org/journals/abs/2006/2006GC001272.shtml>
35. **Alcik H., Ozel O., Wu Y. M., Ozel N. M., Erdik M.** An alternative approach for the Istanbul earthquake early warning system, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2011, vol. 31, pp. 181–187.
36. **Wang J. P., Wu Y. M., Lin T. L., Brant L.** The uncertainties of a Pd3-PG V onsite earthquake early warning system, *Soil dynamics and earthquake engineering*, 2012, vol. 36, pp. 32–37.
37. **Moser P., Moaveni B.** Design and Deployment of a Continuous Monitoring System for the Dowling Hall Footbridge, *Experimental Techniques, Society for Experimental Mechanics*, 2013, vol. 37, pp. 15–26.
38. **Satriano C., Yih-MinWub, Aldo Zollo, Hiroo Kanamori.** Earthquake early warning: Concepts, methods and physical grounds, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2011, vol. 31, pp. 106–118.
39. **Aliev T. A., Abbasov A. M., Guluyev Q. A., Pashaev F. H., Sattarova U. E.** System of robust noise monitoring of anomalous seismic processes, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2013, vol. 31, 33, pp. 11–15.
40. **Aliev T.** Digital noise monitoring of defect origin, Springer-Verlag, London, 2007, 223 p.
41. **Aliev T. A.** Robust Technology with Analysis of Interference in Signal Processing, Kluwer Academic / Plenum Publishers, New York, 2003, 199 p.
42. **Aliev T. A., Guluyev G. A., Pashayev F. H., Sadygov A. B.** Noise monitoring technology for objects in transition to the emergency state, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2012, vol. 31, 27, pp. 755–762.
43. **Aliev T. A., Alizade A. A., Etirmishli G. D., Guluev G. A., Pashaev F. G., Rzaev A. G.** Intelligent Seismoacoustic System for Monitoring the Beginning of Anomalous Seismic Process, *Seismic Instruments*, 2011, vol. 47, no. 1, pp. 1–9.
44. **Aliev T. A., Abbasov A. M., Mamedova G. G., Guluev G. A., Pashaev F. G.** Technologies for Noise Monitoring of Abnormal Seismic Processes, *Seismic Instruments*, 2013, vol. 49, no. 1, pp. 64–80.
45. **Pujol J.** Earthquake location tutorial: a graphical approach and approximate epicentral locations techniques, *Seism. Res. Lett.* 2004, 75, no. 1, pp. 63–74.
46. **Sambridge M., Ghallagher K.** Earthquake hypocenter location using genetic algorithms, *Bulletin of the Seismological Society of America*, October 1993, vol. 83, no. 5, pp. 1467–1491.
47. **Mehdi Khashei, Mehdi Bijari.** An artificial neural network (p, d, q) model for timeseries forecasting, *Expert Systems with Applications*, 2010, vol. 31, 37, pp. 479–489.
48. **Rojas R.** Neural networks, Berlin, Springer-Verlag, 1996, pp. 479.

В. Ю. Рутковский, д-р техн. наук, проф., гл. науч. сотр., rutkov@ipu.ru,

В. М. Суханов, д-р техн. наук, зав. лаб., suhv@ipu.ru,

В. М. Глумов, д-р техн. наук, вед. науч. сотр., vglum@ipu.ru,

Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН, Москва

К задаче управления маломерным свободнолетающим космическим роботом

Рассматривается возможность использования принципа обратной связи в решении задачи управления свободнолетающим космическим роботом в режиме манипуляционного функционирования. В рамках данного подхода вводится математическая модель космического манипуляционного робота (КМР), содержащая в явном виде координаты отклонения схвата от цели в инерциальном пространстве. Предлагается алгоритм вычисления оценок указанных координат при наличии информации о направлении на цель и расстоянии до нее, получаемой с помощью размещенной на корпусе КМР видеокамеры со встроенным дальномером. Решается задача формирования алгоритма управления манипуляционным захватом цели в инерциальном пространстве. Приводится пример компьютерного моделирования динамики космического робота, подтверждающий работоспособность предложенного алгоритма.

Ключевые слова: свободнолетающий космический манипуляционный робот, уравнения движения, алгоритм управления, манипуляционный захват цели, инерциальное пространство

Введение

Рассматриваемые в работе свободнолетающие космические манипуляционные роботы (КМР) относятся к новому классу маломерных объектов космической техники, предназначенных для выполнения различных работ в открытом космосе, в том числе для сборки больших космических конструкций различного назначения, для технического обслуживания внешних устройств пилотируемых орбитальных станций, для удаления с орбит космического мусора и т. д. [1–3]. Очевидная важность этих приложений привлекла внимание ученых к решению целого ряда проблем, связанных с разработкой теории и методов управления свободнолетающими космическими роботами. Наиболее серьезные проблемы управления КМР возникают при решении задач манипуляционного захвата цели и установки полезного груза в заданную точку инерциального (внешнего) пространства. Особые сложности, не встречающиеся в практике использования наземной робототехники, возникают при управлении манипулятором в режиме свободного дрейфа КМР, т. е. при отключенной в целях экономии расхода рабочего тела системе управления положением корпуса робота. Динамика и кинематика КМР в таком режиме существенно усложняется из-за возмущающего влияния движений манипулятора на положение корпуса, что, в свою очередь, отрицательно сказывается на поведении рабочего инструмента (схвата) при решении задачи достижения цели. Весьма сложной по сравнению с рассмотрением манипуляторов на неподвижном основании в этом

случае оказывается и задача определения рабочего пространства [4].

В большинстве публикаций, рассмотренных в обзорной работе [2], задача управления манипулятором свободно дрейфующего КМР решается на основе концепции планирования траектории схвата в инерциальном пространстве с использованием предложенной в работе [4] обобщенной матрицы Якоби для расчета вектора шарнирных скоростей манипулятора космического робота. Указанный подход к управлению КМР в режиме свободного дрейфа может быть реализован только при отсутствии внешних сил и моментов [1].

В работе [5] был предложен альтернативный (без использования процедуры планирования) подход к управлению КМР в классе систем с обратной связью на основе сигналов об отклонении схвата от цели, получаемых с помощью видеокамеры, размещенной на концевом звене манипулятора. Недостатком такого способа размещения камеры является мешающее влияние собственных движений манипулятора, решающего основную задачу управления, на процессы слежения за целью.

В данной работе рассматривается ряд вопросов, связанных с управлением КМР в классе систем с обратной связью по сигналам отклонения схвата от цели, получаемым с помощью видеокамеры (со встроенным дальномером), размещенной в шарнирном подвесе на корпусе робота. В частности решаются:

- задача формирования математической модели КМР, содержащей в явном виде подлежащие ре-

гулированию координаты отклонения схвата от цели;

- задача построения процедуры вычисления оценок указанных регулируемых координат;
- задача синтеза алгоритма управления КМР в режиме манипуляционного захвата цели.

1. Системы координат и уравнения движения

Для простоты изложения рассматривается модель плоского движения свободнолетающего КМР, состоящего из несущего тела (корпуса), снабженного собственной системой управления поступательным и угловым движениями, и трехзвенного манипулятора с вращающимися степенями свободы (рис. 1).

Предполагается, что источником информации о местонахождении цели и расстоянии до нее является система технического зрения (СТЗ), состоящая из шарнирно связанной с корпусом видеокамеры со встроенным в нее лазерным дальномером.

Для описания движения КМР введем следующие системы координат (СК): Σ_I — инерциальная СК CXY , условно называемая инерциальным (внешним по отношению к КМР) пространством; Σ_o — связанная с корпусом КМР СК oxy с началом в центре масс корпуса; СК манипулятора $o_Mx_My_M$ с началом в корневой точке манипулятора; СК подвеса видеокамеры СТЗ $o_vx_vy_v$. Оси последних двух СК параллельны соответствующим осям связанной СК Σ_o .

Обозначим: $q = (q^o, q^\alpha)^T$ — вектор обобщенных координат КМР, где $q^o = (q_1, q_2, q_3)^T \doteq (X_o, Y_o, \vartheta)^T$ — подвектор координат, задающих положение несущего тела в инерциальной СК Σ_I ; $q^\alpha = (q_4, q_5, q_6)^T \doteq (\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3)^T$ — подвектор координат (межзвенные углы), определяющих конфигурацию манипулятора в связанной с корпусом СК oxy (Σ_o).

Кроме того, на рис. 1 обозначено: $I\rho_o = (X_o, Y_o)$ — радиус-вектор центра масс корпуса КМР, определенный в СК Σ_I ; $I\rho_c = (X_c, Y_c)$, $o\rho_c = (x_c, y_c)$ — радиус-векторы центра масс КМР (точки c), опреде-

ленные в Σ_I и Σ_o соответственно; ρ_A — вектор визирования цели, ρ_{sA} — вектор отклонения схвата от цели; X_s, Y_s — координаты концевой точки "s" манипулятора (схвата), определенные в СК Σ_I . Положительным направлением вращения i -го звена считаем его угловое отклонение против часовой стрелки по отношению к продольной оси $(i-1)$ -го звена; X_A, Y_A — координаты точки цели A в Σ_I ; ϑ — угловое положение корпуса в Σ_I ; φ — угол наклона оптической оси видеокамеры в СК $o_vx_vy_v$.

Полученная в работе [6] на основе уравнений Лагранжа второго рода математическая модель плоского движения КМР в векторно-матричной форме имеет вид

$$\begin{bmatrix} A_0(q) & A_{0\alpha}(q) \\ A_{0\alpha}^T(q) & A_\alpha(q) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{q}^o \\ \ddot{q}^\alpha \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_0(q, \dot{q}) \\ B_\alpha(q, \dot{q}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M^0 + M^f \\ M^\alpha \end{bmatrix}, \quad (1)$$

где $A_0, A_\alpha, A_{0\alpha}$ — матрицы переменных коэффициентов $a_{ij}(q)$, $(i, j = \overline{1, 6})$, зависящих от масс и моментов инерции корпуса и звеньев манипулятора с изменяющейся во времени конфигурацией; B_0, B_α — нелинейные вектор-функции, компоненты которых содержат произведения пар обобщенных скоростей с коэффициентами b_{ij}^k , $k = \overline{1, 6}$, также зависящими от текущего распределения масс КМР. Коэффициенты $a_{ij}(q)$ и $b_{ij}^k(q)$ определены в работе [6]. M^0, M^f — векторы управляющих и возмущающих сил и моментов, приложенных к корпусу КМР; M^α — вектор шарнирных моментов манипулятора.

Учитывая, что регулируемые координатами при манипуляционном захвате цели являются отклонения $X_\Delta = X_s(t) - X_A$ и $Y_\Delta = Y_s(t) - Y_A$ координат схвата (концевой точки манипулятора s) от координат цели и скорости их изменения $\dot{X}_\Delta = \dot{X}_s(t)$, $\dot{Y}_\Delta = \dot{Y}_s(t)$, перейдем от модели (1) к новой модели движения КМР относительно переменных X_Δ, Y_Δ . Для этого в модели (1) надо перейти от вектора $q^o = (X_o, Y_o, \vartheta)^T$ к вектору $q^\Delta = (X_\Delta, Y_\Delta, \vartheta)^T$.

Для перехода от q^o к q^Δ необходимо получить соотношения, связывающие координаты X_o с X_Δ и Y_o с Y_Δ . Перенесем начало инерциальной системы координат CXY из точки C в точку A , соответствующую заданному положению неподвижной цели, т. е. в режиме манипуляционного сближения будем предполагать перевод концевой точки груза в начало координат новой инерциальной системы AXY . С учетом этого получим $X_\Delta = -X_s$, $Y_\Delta = -Y_s$, где координаты концевой точки s в новой инерциальной СК записываются в виде

$$X_s = X_o + x_s C\vartheta - y_s S\vartheta, \quad Y_s = Y_o + x_s S\vartheta + y_s C\vartheta. \quad (2)$$

Отсюда

$$X_o = -x_s C\vartheta + y_s S\vartheta - X_\Delta, \quad Y_o = -x_s S\vartheta - y_s C\vartheta - Y_\Delta. \quad (3)$$

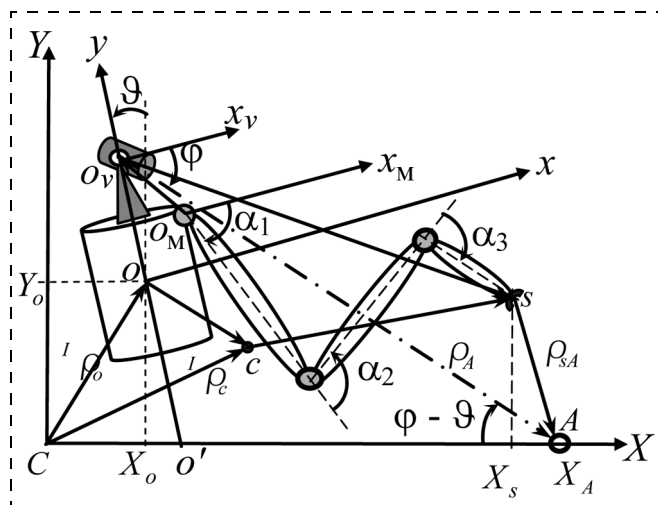


Рис. 1. Текущая конфигурация КМР в режиме захвата цели

где координаты x_s, y_s точки s в связанной СК определяются выражениями

$$x_s = x_M + \sum_{i=1}^3 l_i C\alpha_{1-i}, y_s = y_M + \sum_{i=1}^3 l_i S\alpha_{1-i}. \quad (4)$$

Здесь и далее используется следующие сокращенные обозначения:

$$\alpha_{k-n} = \sum_{i=k}^n \alpha_i, k < n,$$

$$S\alpha_{1-i} = \sin\alpha_{1-i}, C\alpha_{1-i} = \cos\alpha_{1-i}.$$

Подставляя (4) в (3), имеем

$$\begin{aligned} X_o &= -X_\Delta - \left(x_M + \sum_{i=1}^3 l_i C\alpha_{1-i} \right) C\vartheta + \\ &+ \left(y_M + \sum_{i=1}^3 l_i S\alpha_{1-i} \right) S\vartheta; \\ Y_o &= -Y_\Delta - \left(x_M + \sum_{i=1}^3 l_i C\alpha_{1-i} \right) S\vartheta - \\ &- \left(y_M + \sum_{i=1}^3 l_i S\alpha_{1-i} \right) C\vartheta. \end{aligned} \quad (5)$$

Используя (5), получаем выражения для \ddot{X}_o и \ddot{Y}_o в исходной модели (1):

$$\begin{aligned} \ddot{X}_o &= -\ddot{X}_\Delta + \sum_{i=1}^3 \left\{ \ddot{\alpha}_i \left[\sum_{j=1}^3 l_j S(\vartheta + \alpha_{1-j}) \right] \right\} + \\ &+ \ddot{\vartheta} \left[x_M S\vartheta + y_M C\vartheta + \sum_{i=1}^3 l_i S(\vartheta + \alpha_{1-i}) \right] + \\ &+ \dot{\vartheta}^2 \left[x_M C\vartheta - y_M S\vartheta + \sum_{i=1}^3 l_i C(\vartheta + \alpha_{1-i}) \right] + \\ &+ 2\dot{\vartheta} \sum_{i=1}^3 l_i \dot{\alpha}_{1-i} C(\vartheta + \alpha_{1-i}) + \\ &+ \sum_{i=1}^3 l_i [(\dot{\alpha}_{1-i})^2 C(\vartheta + \alpha_{1-i})]; \\ \ddot{Y}_o &= -\ddot{Y}_\Delta - \sum_{i=1}^3 \left\{ \ddot{\alpha}_i \left[\sum_{j=1}^3 l_j C(\vartheta + \alpha_{1-j}) \right] \right\} - \\ &- \ddot{\vartheta} \left[x_M C\vartheta - y_M S\vartheta + \sum_{i=1}^3 l_i C(\vartheta + \alpha_{1-i}) \right] + \\ &+ \dot{\vartheta}^2 \left[x_M S\vartheta + y_M C\vartheta + \sum_{i=1}^3 l_i S(\vartheta + \alpha_{1-i}) \right] + \\ &+ 2\dot{\vartheta} \sum_{i=1}^3 l_i \dot{\alpha}_{1-i} S(\vartheta + \alpha_{1-i}) + \\ &+ \sum_{i=1}^3 l_i [(\dot{\alpha}_{1-i})^2 S(\vartheta + \alpha_{1-i})]. \end{aligned} \quad (6)$$

Подставляя выражения (6) в уравнения (1) и переходя от вектора $q = (q^0, q^\alpha)^T$ к вектору $\tilde{q} = (q^\Delta, q^\alpha)^T$, после несложных, хотя и громоздких, преобразо-

ваний получим модифицированную модель движения КМР, содержащую в явном виде вторые производные регулируемых координат X_Δ и Y_Δ . Полученная модель в векторно-матричной форме может быть записана в виде

$$\begin{bmatrix} \tilde{A}_0(\tilde{q}) & \tilde{A}_{0\alpha}(\tilde{q}) \\ \tilde{A}_{0\alpha}^T(\tilde{q}) & \tilde{A}_\alpha(\tilde{q}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{q}^\Delta \\ \ddot{q}^\alpha \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \tilde{B}_0(\tilde{q}, \dot{\tilde{q}}) \\ \tilde{B}_\alpha(\tilde{q}, \dot{\tilde{q}}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M^0 + M^f \\ M^\alpha \end{bmatrix}. \quad (7)$$

Модифицированная модель (7) структурно идентична исходной модели (1), отличаясь тем, что вместо вектора $q^0 = (X_o, Y_o, \vartheta)^T$ введен вектор $q^\Delta = (X_\Delta, Y_\Delta, \vartheta)^T$. При этом полный вектор $q = (q^0, q^\alpha)^T$ заменяется на вектор $\tilde{q} = (q^\Delta, q^\alpha)^T$. Соотношения для вычисления элементов $\tilde{a}_{ij}, i, j = \overline{1, 6}$, матрицы

$$\tilde{A} = \begin{bmatrix} \tilde{A}_0 & \tilde{A}_{0\alpha} \\ \tilde{A}_{0\alpha}^T & \tilde{A}_\alpha \end{bmatrix} \text{ новой модели (7) и векторов } \tilde{B}_0(\tilde{q}, \dot{\tilde{q}}), \tilde{B}_\alpha(\tilde{q}, \dot{\tilde{q}}) \text{ приведены в работе [7].}$$

2. Определение оценок координат отклонения схвата от цели по измерениям СТЗ, установленной на корпусе КМР

Для определения оценок $\hat{X}_\Delta, \hat{Y}_\Delta$ координат отклонения схвата от цели X_Δ, Y_Δ введем в рассмотрение вытекающую из рис. 1 вспомогательную геометрию, представленную на рис. 2.

Углы φ, ϑ и расстояние $|\rho_A| = \overline{o_v A}$ до цели измеряются.

Введем дополнительно углы γ, ϕ (рис. 2). Очевидно, справедливо соотношение

$$\varphi + \phi - \gamma = \frac{\pi}{2}, \quad (8)$$

в котором необходимо найти выражения для определения углов ϕ, γ .

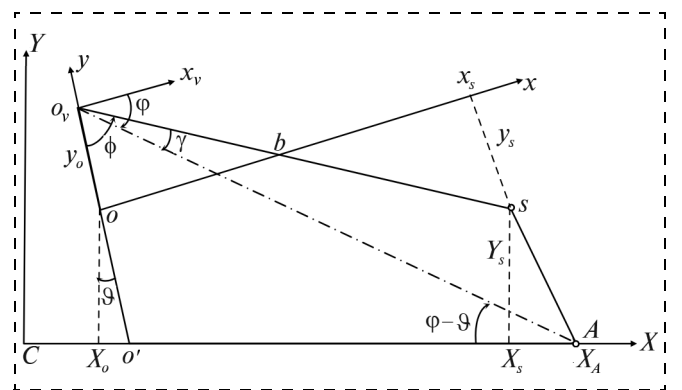


Рис. 2. Вспомогательная геометрия

Из подобия треугольников $\Delta o_v ob \sim \Delta x_s b$ следует

$$\frac{|y_s|}{|y_{ov}|} = \frac{\overline{x_s b}}{|x_s| - \overline{x_s b}} = \frac{\overline{ab}}{\overline{o_v b}}, \quad (9)$$

где $\overline{x_s b}$, $\overline{s b}$, $\overline{o_v b}$ — принятые обозначения сторон треугольников (как отрезков прямых), $y_{ov} \equiv \overline{o o_v}$, x_s , y_s — координаты схвата в связанной СК Σ_o , $x_s = x_{o_1} + \sum_{j=1}^3 \left[l_j \cos \left(\sum_{i=1}^j \alpha_i \right) \right]$, $y_s = y_{o_1} + \sum_{j=1}^3 \left[l_j \sin \left(\sum_{i=1}^j \alpha_i \right) \right]$, l_j , ($j = 1, 2, 3$) — длины звеньев манипулятора; $\alpha_i = \alpha_i(t)$, $i = 1, 2, 3$, — межзвенные углы.

Из (9) следует

$$\overline{x_s b} = \frac{|x_s y_s|}{|y_s| + |y_{ov}|}. \quad (10)$$

Поскольку $\operatorname{tg} \phi = \frac{\overline{x_s b}}{|y_s|}$, то с учетом (10) найдем

$$\phi = \operatorname{arctg} \frac{|x_s|}{|y_s| + |y_{ov}|}. \quad (11)$$

Учитывая (11), получим

$$|p_s| = \overline{o_v s} = \frac{x_s}{\sin \phi} = \sqrt{x_s^2 + (y_s + y_{ov})^2} \quad (12)$$

и, используя (8), найдем

$$\gamma = \phi - \operatorname{arccctg} \frac{|x_s|}{|y_s| + |y_{ov}|}. \quad (13)$$

Для треугольника $\Delta o_v s A$ справедливы выражения для угла

$$\angle s A o_v = \operatorname{arctg} \left(\frac{\overline{o_v s} - \overline{o_v A}}{\overline{o_v s} + \overline{o_v A}} \operatorname{ctg} \frac{\gamma}{2} \right) + \frac{\pi - \gamma}{2} \quad (14)$$

и расстояния от точки "s" до цели A

$$\overline{s A} = |p_{sA}| = \frac{\overline{o_v s} \sin \gamma}{\sin(\angle s A o_v)}. \quad (15)$$

В соответствии с рис. 2 имеем

$$\angle s A C = \phi - \vartheta + \angle s A o_v. \quad (16)$$

Выражения (14)—(16) позволяют вычислять оценки координат отклонения точки "s" от целевой точки A:

$$\begin{aligned} \hat{X}_\Delta &= X_s - X_A = \overline{s A} \cos(\angle s A C), \\ \hat{Y}_\Delta &= Y_s - Y_A = \overline{s A} \sin(\angle s A C). \end{aligned} \quad (17)$$

3. Алгоритм случайного поиска в режиме захвата цели

В работе [8] были решены три задачи, предвещающие возможность перехода КМР в рассматриваемый ниже режим манипуляционного захвата цели в инерциальном пространстве Σ_f :

1) предложен вычислительный алгоритм оперативного построения секторного рабочего пространства КМР, зависящего от исходной конфигурации манипулятора q_0^α и текущего распределения масс системы (с учетом массы переносимого груза);

2) определено расстояние $d^* = \overline{o_v A^*}$, при котором цель A становится манипуляционно достижимой для КМР;

3) определено требуемое значение начальной ориентации КМР ϑ_0^* , при котором заранее построенное секторное рабочее пространство "накрывает" целевую точку A.

Полагая указанные задачи решенными, рассмотрим далее задачу формирования алгоритма управления КМР, динамика которого описывается уравнениями (7), при манипуляционном захвате цели с использованием оперативного вычисляемых по формулам (11)—(17) оценок координат отклонения \hat{X}_Δ , \hat{Y}_Δ конечной точки "s" от целевой точки A.

Пусть КМР, снабженный шарнирно связанной с корпусом видеокамерой, ориентированной на целевую точку A (см. рис. 1), завис в окрестности цели на расстоянии $d^* = \overline{o_v A}$, измеряемом встроенным в видеокамеру дальномером. Конфигурация q_0^α , текущее распределение масс КМР с грузом известны. Требуемая начальная ориентация корпуса ϑ_0^* выполнена с помощью системы управления движением КМР (поступательным и угловым), которая в режиме захвата цели отключается, и дальнейшие движения КМР определяются только действием шарнирных моментов M_{a_r} . При этом изменяются не только межзвенные углы q^α , но, как следствие, и компоненты вектора q^Δ , из которых в нашем случае X_Δ , Y_Δ являются регулируемыми координатами.

Напомним, что в отличие от известных методов управления космическими роботами, основанных на планировании траектории схвата [1—4], мы будем решать задачу манипуляционного захвата неподвижной цели в заданной точке инерциального пространства на основе принципов управления в классе систем с обратной связью.

В режиме манипуляционной установки груза в заданную точку $A(X_A, Y_A)$ начальное состояние КМР определим в виде

$$q_0^\Delta = (X_{\Delta 0}, Y_{\Delta 0}, \vartheta_0^*), \quad q_0^\alpha = (\alpha_1^0, \alpha_2^0, \alpha_3^0), \quad \dot{q}_0 = 0.$$

При этом считается, что в начальный момент времени оптическая ось камеры ориентирована на цель. Это позволяет измерять текущее расстояние от камеры до цели с помощью встроенного в видео-

камеру дальномера. Чтобы в процессе управления цель A оставалась в поле зрения видеокамеры, должно быть регулируемым и угловое отклонение оптической оси от цели $\varphi_\Delta = (\varphi - \varphi^*)$, где φ^* — угловое положение камеры, при котором линия визирования СТЗ для заданного начального состояния вектора q_0^Δ проходит через целевую точку. Ошибка φ_Δ может быть определена (измерена) как величина снижения уровня выходного сигнала СТЗ $u_{СТЗ}(\varphi_\Delta) = f(\varphi_\Delta^{-1})$ при отклонении оси видеокамеры от направления на цель.

Пусть измеряемыми координатами в рассматриваемом режиме манипуляционного функционирования являются:

$$\vartheta, r_{sA} = |\rho_{sA}|, \varphi, \alpha_r, \dot{\alpha}_r \quad (r = 1, 2, 3).$$

Цель управления определим в виде следующих трех подзадач, в комплексе решающих задачу захвата цели A в инерциальном пространстве:

- задача непрерывности слежения за целью

$$\varphi_\Delta = (\varphi - \varphi^*) \rightarrow 0 \quad \forall t \leq t_k; \quad (18.1)$$

- задача достижимости цели

$$|X_\Delta(t_k)| \leq \varepsilon_X, |Y_\Delta(t_k)| \leq \varepsilon_Y; \quad (18.2)$$

- задача обеспечения безударного ("мягкого") захвата цели

$$\dot{X}_\Delta(t_k) \approx 0, \dot{Y}_\Delta(t_k) \approx 0, \quad (18.3)$$

где t_k — время выполнения операции, $\varepsilon_X, \varepsilon_Y = \text{const}$ — малые постоянные.

Для решения указанного комплекса задач введем раздельное управление движениями схвата, приняв, что регулирующим воздействием на координату X_Δ является шарнирный момент M_{α_1} , вызывающий изменение угла α_1 . Координата Y_Δ управляется шарнирным моментом M_{α_2} , изменяющим α_2 . Управление ориентацией схвата в задаче захвата цели считаем отсутствующим, т. е. $M_{\alpha_3} = 0$ ($\alpha_3 = \text{const}$).

Задача (18.1), связанная с организацией процесса слежения за целью шарнирно связанной с корпусом КМР видеокамеры, является вспомогательной, однако ее решение необходимо для осуществления текущих измерений расстояния $r_{sA} = |\rho_{sA}|$ до целевой точки A . Эти измерения участвуют далее в вычислении по формулам (11)—(17) оценок \dot{X}_Δ и \dot{Y}_Δ , управляющих приводами плечевого (α_1) и локтевого (α_2) шарниров при решении основной задачи (18.2). Процесс слежения за целью осуществляется с помощью подсистемы управления приводом подвеса камеры на основе использования РД-алгоритма в цепи обратной связи по координате $\varphi_\Delta(t)$, моделирующей сигнал отклонения оси чувствительно-сти видеокамеры от направления на цель.

В качестве возможного пути для решения задачи (18.2), связанной с управлением поступательным движением схвата (X_Δ, Y_Δ), предлагается использовать модификацию известного алгоритма случайного поиска с возвратом [9], работоспособность которого

обеспечивается благодаря удержанию только удачных случайных шагов управления $\Delta q_{r(n)}^s < 0$, уменьшающих отклонение концевой точки s от цели. Неудачные шаги ($q_{r(n)}^s \geq 0$) исправляются за счет изменения знака воздействия на очередном шаге управления. Введенная здесь оценка $\Delta q_{r(n)}^s$, определяющая характер изменения регулируемых координат $X_{\Delta n}, Y_{\Delta n}$ на n -м шаге управления, имеет вид

$$\Delta q_{r,n}^s = |q_r^\Delta(t_2^r)|_n - |q_r^\Delta(t_1^r)|_n, \quad r = 1, 2; \quad n = 1, 2, \dots \quad (19)$$

Управление шарнирными углами осуществляется на интервалах управления T_n^r , длительность которых пропорциональна модулям значений регулируемых координат $q_1^\Delta \doteq X_\Delta, q_2^\Delta \doteq Y_\Delta$ в начале n -го интервала управления, т. е.

$$T_n^r = (t_2^r - t_1^r)_n = k_r |q_r^\Delta(t_1^r)|_n, \quad r = 1, 2. \quad (20)$$

Рекуррентная формула алгоритма по каждому из двух локальных каналов управления может быть записана в виде

$$\begin{aligned} u_{n+1}^r &= \xi_{n+1}^r \bar{u}^r \quad \forall t \in T_{n+1}^r, \\ \xi_{n+1}^r &= \begin{cases} 1 \quad \forall \Delta q_{r,n}^s < 0, \\ -1 \quad \forall \Delta q_{r,n}^s \geq 0, \end{cases} \quad (21) \\ r &= 1, 2; \quad n = 1, 2, \dots, \end{aligned}$$

где ξ_{n+1}^r — знак постоянного по уровню управляющего напряжения \bar{u}^r на входе r -го привода манипулятора на $(n+1)$ -м интервале управления; оценка $\Delta q_{r,n}^s$ контролирует характер изменения регулируемой координаты на предыдущем шаге управления.

Следует заметить, что в алгоритме (21) оператор случайного шага ξ_{n+1}^r является случайным событием (в смысле выбора одного из значений $(+1, -1)$) преимущественно на первом шаге управления, совершаемом в качестве пробного движения ($n=0$). По этой причине значение первого шага выбирается относительно небольшим $T_1^r = T_{\min}^r$, соответствующая постоянному шагу $T_{\min}^r = \text{const}$, принятому для области малых отклонений от цели ε_1 , определенной в виде ($\varepsilon_2 < |q_r^s| \leq \varepsilon_1$), где ε_2 — граница области безударного захвата цели. На втором и последующих шагах T_n^r , определяемых выражением (20), знак управляющего напряжения устанавливается правилом, приведенным во второй части алгоритма (21), в соответствии с которым при правильном выборе знака $\xi_n = (+1, -1)$ на n -м шаге управления этот знак должен быть сохранен и на $(n+1)$ -м шаге. Правильность выбора знака ξ_n оценивается по результату $\Delta q_{r,n}^s < 0$.

Алгоритм управления в области ($\varepsilon_2 < |q_r^s| \leq \varepsilon_1$) условно назовем $u_{\varepsilon_1}^r$, напомним, что он не отличается от алгоритма (21) за исключением функции

определения текущего интервала управления (20), принимающего в указанной области вид

$$T_n^r = T_{\min}^r = \text{const.}$$

В целом решение задачи (18.2) может быть осуществлено путем попеременной ($r = 1 \vee 2$) или одно-временной ($r = 1 \ \& \ 2$) активации подсистем управ-

ления сближением. В обоих случаях алгоритм, определяемый выражениями (21), сохраняет работоспособность, однако для решения задачи безударной встречи (18.3) область его действия в процессе сближения с целью A должна быть ограничена моментом вхождения в малую ε_2 -окрестность, определенную в виде $(|X_\Delta|, |Y_\Delta| \leq \varepsilon_2, \varepsilon_2 < \varepsilon_1)$ и содержащую точку A . В ε_2 -окрестности исходный алгоритм (21) должен быть заменен на такой закон управления u_{ε_2} (например, ПД алгоритм [5]), который способен обеспечить монотонный характер изменения регулируемых координат X_Δ, Y_Δ при $\dot{X}_\Delta, \dot{Y}_\Delta \rightarrow 0$ в завершающей фазе сближения с целью.

4. Пример компьютерной реализации предложенного подхода к управлению КМР

На рис. 3 приведен пример компьютерной реализации в системе MATLAB-Simulink предложенного подхода к управлению КМР в режиме манипуляционной установки груза для случая попеременной работы подсистем управления плечевым (α_1) и кистевым (α_2) шарнирами. В качестве математической модели объекта были использованы уравнения (7).

Числовые значения основных параметров модели КМР, необходимые для расчета коэффициентов матриц $\tilde{A}_0, \tilde{A}_\alpha, \tilde{A}_{0\alpha}$ и нелинейных функций $\tilde{B}_0, \tilde{B}_\alpha$ (см. работы [6, 7]) в уравнениях (7), представлены в таблице; $X_{\Delta 0} = 0,31$ м, $Y_{\Delta 0} = 0,67$ м; $\vartheta_0, \dot{\vartheta}_0 = 0$. Начальная конфигурация манипулятора q_0^α определена значениями ($\alpha_1^0 = -1,5$ рад; $\alpha_2^0 = 2,8$ рад; $\alpha_3^0 = -1,5$ рад).

Из осциллограмм видно, что управляемые в соответствии с алгоритмами u_n^r, u_{ε_1} и u_{ε_2} (рис. 3, а) перемещения звеньев (α_1, α_2) (рис. 3, б) обеспечивают перевод характерной точки "а" груза из начального положения $X_\Delta(t_0) = 0,3$ м, $Y_\Delta(t_0) = 0,67$ м в малую окрестность целевой точкой A ($\varepsilon_2 \leq 0,1$ м) за время $t_{\varepsilon_2} = 200$ с (рис. 3, в). При этом ПД алгоритм

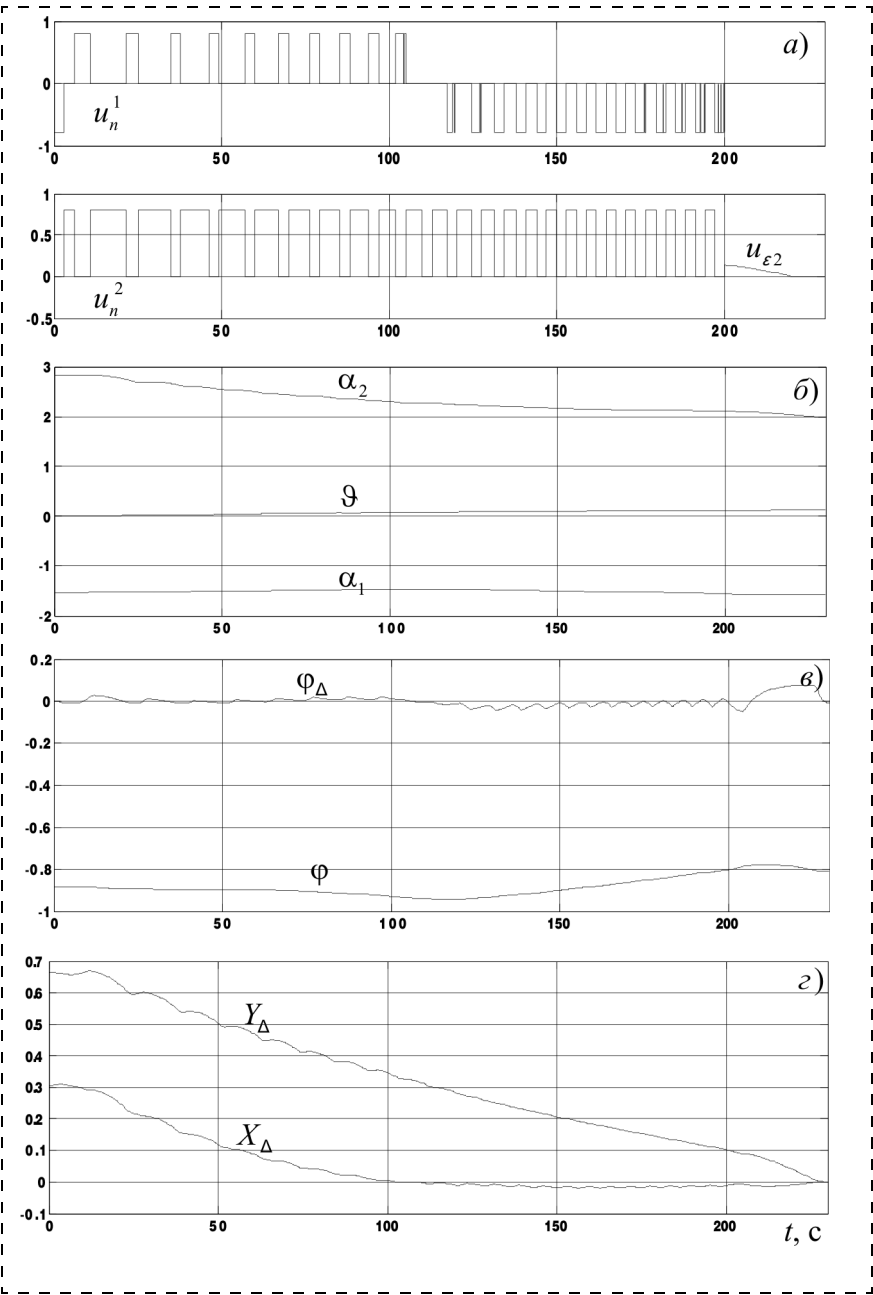


Рис. 3. Управляющие сигналы и переходные процессы в режиме манипуляционного функционирования КМР при использовании алгоритма случайного поиска

Параметры модели КМР

$m_i, \text{ кг}, i = \overline{0, 4}$	$J_i, \text{ кг} \cdot \text{ м}^2, i = \overline{0, 4}$	$l_i, \text{ кг}, i = \overline{0, 3}$	$r_{ci}, \text{ м}, i = \overline{1, 3}$	$(x_m, y_m), \text{ м}, i = 0$
[500;15; 10; 5;10]	[90;2; 0,8; 0,1;0,0]	[1,2; 1,0; 0,4]	[0,7; 0,6; 0,2;]	[0,4; 0,6]

управления приводом подвеса камеры с достаточной точностью ($\varphi_{\Delta} \leq 0,05$) поддерживает требуемое направление оптической оси видеокамеры на целевую точку (рис. 3, в), позволяющее встроенному в нее дальномеру измерять текущее расстояние до цели и вычислять оценки регулируемых координат X_{Δ} , Y_{Δ} , используемые в алгоритмах управления (21) и u_{ε_1} .

На завершающем участке моделирования, начиная с момента $t_{\varepsilon_2} = 200$ с, реализован процесс "мягкой" стыковки груза с целью (рис. 3, а, г), осуществленный с помощью адаптивного ПД алгоритма u_{ε_2} , описанного в работе [5].

Заключение

Решена конкретная задача, связанная с разработкой нового (без использования известной процедуры планирования траектории схвата) подхода к управлению свободнолетающим космическим роботом в режиме манипуляционного функционирования в инерциальном пространстве. Представляется, что разработанная процедура вычисления оценок координат отклонения схвата манипулятора от цели должна позволить практически реализовать предложенный в работе поисковый алгоритм управления манипулятором КМР в классе систем с обратной связью, использующей сигналы размещенной на корпусе робота видеокамеры со встроенным дальномером.

Полученные в работе результаты носят достаточно локальный характер, что пока затрудняет осуществление углубленного сравнения с результатами применения традиционного подхода к проблеме управления свободнолетающими КМР на основе процедуры планирования траектории схвата.

Дальнейшее развитие предложенного в работе подхода к управлению КМР в классе систем с обратной связью заключается в постановке и решении задач формирования алгоритмов, обеспечивающих работоспособность и требуемое качество функционирования КМР при наличии внешних возмущений и плохой определенности модели объекта.

Список литературы

1. Dubowsky S., Papadopoulos E. The Kinematics, Dynamics, and Control of Free-Flying and Free-Floating Space Robotic Systems // IEEE Transact. Robot. Automat. 1993. V. 9. № 5. P. 531–543.
2. Moosavian S. Ali A., Papadopoulos E. Free-flying Robots in Space: an Overview of Dynamics Modeling, Planning and Control // J. Robotica. 2007. N. 25 (5). P. 537–547.
3. Xu W. F., Liu Yu., Liang B. et al. Autonomous Path Planning and Experiment Study of Free-floating Space Robot for Target Capturing // J. Intell. Robot. Syst. 2008. N. 51. P. 303–331.
4. Umetani Y., Yoshida K. Resolved motion rate control of space manipulators with generalized Jacobian matrix // IEEE Trans. Robot. Automat. 1989. N. 5 (3). P. 303–314.
5. Рутковский В. Ю., Суханов В. М., Глумов В. М. Некоторые вопросы управления свободнолетающим космическим манипуляционным роботом // Автоматика и Телемеханика. 2013. № 11. С. 62–83.
6. Рутковский В. Ю., Суханов В. М., Глумов В. М. Уравнения движения и управление свободнолетающим космическим манипуляционным роботом в режиме реконфигурации // Автоматика и Телемеханика. 2010. № 1. С. 80–98.
7. Силаев А. В., Суханов В. М. Математическая модель свободнолетающего космического робота в режиме манипуляционного функционирования во внешнем пространстве // Матер. конф. "Управление в технических, эргатических, организационных и сетевых системах" (УТЭОСС–2012). СПб.: ОАО "Концерн ЦНИИ "Электроприбор", 2012. С. 806–809.
8. Суханов В. М., Рутковский В. Ю., Глумов В. М. Определение рабочей зоны и требуемого начального положения свободнолетающего космического робота при захвате цели // Автоматика и Телемеханика. 2014. № 11. С. 150–159.
9. Справочник по теории автоматического управления / Под ред. А. А. Красовского. М.: Наука, 1987. 712 с.

On a Small Free-Flying Space Robot Control Task

V. Yu. Rutkovsky, rutkov@ipu.ru, V. M. Sukhanov, suhv@ipu.ru, V. M. Glumov, vglum@ipu.ru,
Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences, 117997, Moscow, Russian Federation

Corresponding author: Sukhanov Victor M., Leading Resercher,
Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences,
117997, Moscow, Russian, suhv@ipu.ru

Received on November 19, 2014

Aseeped on December 03, 2014

The authors discuss a possibility of application of the feedback principle for the task of control of a free-flying space handling robot (SHR) in the mode of handling operation. They propose a robot consisting of the main body (case), which has the control system by rotation and translational movement, and the three-links manipulator with rotation degree of freedom for each link. The SHR is expected to have a system of technical vision for obtaining information about the location of the target and the distance to it. The mathematical model of the space handling robot is introduced. For simplicity reasons the plane motion of the SHR is considered. The model has the coordinates of a grip deflection from a target in the inertial space in an explicit form. An algorithm is proposed for estimation of the coordinates with account of the information about the direction of the target and the distance to it. This information is obtained with the use of the range finder built in the video camera which is placed on the SHR case. The task of the control algorithm formation by the target capture in the inertial space is solved. The control task is determined as the solution of the three subtasks: 1) continuous target tracking, 2) accessibility of the target and 3) guarantee of soft-docking. The first subtask is an auxiliary one. But its solution is necessary for realization of measurements of the distance between the grip and the target. As a way to solve the second subtask the authors suggest a modification of the well-known random search with a return algorithm. Its efficiency is guaranteed by taking into account only the successful random

steps of control which decrease the distance to the target. For soft docking (subtask 3) the area of the suggested algorithm must be restricted by the time moment when the SHR enters the small area which includes point A (target). An example of the free-flying space robot dynamics computer simulation is presented, which proves the efficiency of the proposed algorithm.

Keywords: free-flying space handling robot, equation of motion control algorithm, manipulation takeover target, inertial space

For citation:

Rutkovsky V. Yu., Sukhanov V. M., Glumov V. M. On a Small Free-Flying Space Robot Control Task, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2015, vol. 16, no. 3, pp. 159—166.

DOI: 10.17587/mau.16.159-166

References

1. **Dubowsky S., Papadopoulos E.** The Kinematics, Dynamics, and Control of Free-Flying and Free-Floating Space Robotic Systems, *IEEE Transact. Robot. Automat.*, 1993, vol. 9, no. 5, pp. 531—543.
2. **Moosavian S. Ali A., Papadopoulos E.** Free-flying Robots in Space: an Overview of Dynamics Modeling, Planning and Control, *J. Robotica*, 2007, no. 25 (5), pp. 537—547.
3. **Xu W. F., Liu Yu., Liang B., Yangsheng Xu, Wenyi Qiang.** Autonomous Path Planning and Experiment Study of Free-floating Space Robot for Target Capturing, *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 2008, no. 51, p. 303—331.
4. **Umetani Y., Yoshida K.** Resolved motion rate control of space manipulators with generalized Jacobian matrix, *IEEE Trans. Robot. Automat.*, 1989, no. 5 (3), pp. 303—314.
5. **Rutkovsky V. Yu., Sukhanov V. M., Glumov V. M.** Nekotorye voprosy upravleniya svobodnoletajushhim kosmicheskim manipulacionnym robotom (Some questions of control by free-flying space handling robot), *Avtomatika i Telemekhanika*, 2013, no. 11, pp. 62—83 (in Russian).
6. **Rutkovsky V. Yu., Sukhanov V. M., Glumov V. M.** Uravneniya dvizheniya i upravlenie svobodnoletajushhim kosmicheskim manipulacionnym robotom v rezhime rekonfiguracii (The equations of motion and control by free-flying space handling robot), *Avtomatika i Telemekhanika*, 2010, no. 1, pp. 80—98 (in Russian).
7. **Silaev A. V., Sukhanov V. M.** Matematicheskaja model' svobodnoletajushhego kosmicheskogo robota v rezhime manipulacionnogo funkcionirovanija vo vneshnem prostranstve (The mathematical model of free-flying space robot condition of handling functioning in other space), *Materialy konferencii "Upravlenie v tehnikeskikh, jergativnykh, organizacionnykh i setevykh sistemah" (UTJeOSS-2012)*, Saint Petersburg, OAO "Koncern CNII "Jelektropribor", 2012, pp. 806—809 (in Russian).
8. **Sukhanov V. M., Rutkovsky V. Yu., Glumov V. M.** Opreделение rabochej zony i trebuemogo nachal'nogo polozhenija svobodnoletajushhego kosmicheskogo robota pri zahvate celi (The definition of the working area and the required initial position of free-flying space robot when capturing objective), *Avtomatika i Telemekhanika*, 2014, no. 11, pp. 150—159 (in Russian).
9. **Krasovskiy A. A.** *Spravochnik po teorii avtomaticheskogo upravlenija* (Handbook of automatic control theory), Moscow, Nauka, 1987, 712 p. (in Russian).