

М. Х. РЕФАН, А. ДАМЕШГИ, М. КАМАРЗАРРИН

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РЕКУРРЕНТНЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ И ГЕНЕТИЧЕСКОГО АЛГОРИТМА ДЛЯ ПРЕДСКАЗАНИЯ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ ПОПРАВОК К ПСЕВДОДАЛЬНОСТЯМ GPS

Предлагается восполнить отсутствие сигнала и задержку передачи дифференциальных поправок в системе реального времени (Real Time Differential GPS, RTDGPS) посредством оценок будущих значений поправок псевдодальности (Pseudo-range-Range Corrections, PRC). Для оценивания используются рекуррентная нейронная сеть (РНС) и генетический алгоритм (ГА). Рассмотрению подлежит RTDGPS с применением двух недорогих приемников на опорной и пользовательских станциях. Приведенные результаты моделирования и экспериментов показывают, что предсказание PRC повышает точность RTDGPS.

Ключевые слова: рекуррентные нейронные сети, генетический алгоритм, дифференциальные поправки, псевдодальность, GPS.

Введение

Измерения GPS включают ионосферные и тропосферные погрешности, а также погрешности часов и орбиты спутника [1-2]. Для повышения точности позиционирования используется дифференциальный режим, в котором используется опорная станция и приемник пользователя [3]. Опорная станция рассчитывает поправки к погрешностям и передает их приемнику пользователя по радио- или другим каналам связи [4]. Дифференциальный режим работает по кодовым и фазовым наблюдениям [5]. Для гражданских пользователей она, как правило, реализуется только по кодовому каналу [6]. Дифференциальный режим может осуществляться в реальном времени или путем постобработки. Работа дифференциальной GPS в реальном времени не предусматривает предварительной обработки [7-8]. При этом GPS приемник, вырабатывающий поправки к PRC, помещается в заданном месте вместе с системой, преобразующей поправки в формат специального протокола Радиотехнической комиссии морских служб (RTCM) [9-12]. Посылка поправок к пользователю в реальном времени неизбежно сопровождается некоторой временной задержкой [13]. Поправки на момент времени t должны быть введены пользователем; однако это практически невозможно в силу указанных задержек [14]. Точность позиционирования полностью зависит от скорости передачи поправок от опорной к пользовательской станции. Для компенсации задержки в протокол RTCM вводится скорость из-

Рефан Мухаммад Хусейн. Доктор наук, доцент Педагогического института Шахид Раджи, факультет электротехники и вычислительной техники (Тегеран, Иран).

Дамешги Адель. Аспирант Педагогического института Шахид Раджи, факультет электротехники и вычислительной техники.

Камарзаррин Мернуш. Аспирант Университета Шахид Бехешти, факультет электротехники и вычислительной техники (Тегеран, Иран).

Научный редактор перевода д. т. н. Д. А. Кошаев.

менения поправки псевдодальности (Range Rate Correction, RRC). Значение поправки RRC равно разнице между расчетной PRC на опорной станции и полученной PRC на станции пользователя, деленной на разность во времени между двумя станциями.

После устранения погрешности избирательного доступа использование RRC для компенсации задержки PRC снижает точность позиционирования RTDGPS [15]. Это происходит потому, что приемник не может рассчитать точное значение RRC [16-17]. Решение, которое предлагают производители пользовательских приемников, состоит в том, чтобы скомпенсировать отсутствие поправок путем использования предыдущих значений PRC вместо текущих. В зависимости от настроек пользователя, возраст данных о PRC, до которого они могут использоваться, варьируется в пределах 0-255с.

В статье представлен алгоритм прогноза PRC, предназначенный для использования в двух ситуациях: во-первых, когда пользователь теряет связь с опорной станцией, вырабатывающей поправки, или они передаются с большой задержкой и, во-вторых, когда опорная станция не вырабатывает значения PRC из-за невозможности локализации сбоя в измерениях. Чтобы ликвидировать пробелы в передаче поправок, предлагается наряду с текущими поправками передавать спрогнозированные PRC для нескольких следующих моментов. При отсутствии условий для выработки на опорной станции очередной поправки предлагается сформировать и транслировать экстраполированные значения поправок только на текущий момент. Прогноз поправок производится на основе набора измерений псевдодальностей, полученных на некотором интервале с использованием PRC. При использовании в динамических системах структура PRC обычно бывает разделена на две части. Упреждающая PRC включает многослойный перцептрон а другая – RNN [18-20]. Для обучения PRC использовался генетический алгоритм.

1. Опорная станция RTDGPS

Основная идея построения опорной станции состоит в выработке протокола RTCM на базе недорогих приемников. Значения PRC подаются в блок предсказания. Предсказанные значения наряду с другими полученными начальными данными конвертируются в протокол RTCM по специальному алгоритму.

а) Теория повышения точности RTDGPS

Чтобы активировать работу системы, опорная станция сравнивает коды принятых сигналов с выработанными кодами для получения задержки в прохождении сигнала и умножает ее на скорость света, получая псевдодальность. Координаты спутника можно рассчитать по полученным от него данным. Имея точные координаты опорной станции и спутника, можно также рассчитать реальное расстояние. Реальную псевдодальность можно получить, прибавив погрешность часов приемника к реальному расстоянию. Опорная станция вычитает эту величину из псевдодальности, полученной по сигналу спутника, и посылает ее мобильному приемнику через передатчик. Если точные координаты приемника известны, можно рассчитать погрешности псевдодальностей для спутников. GPS приемник, который рассчитывает погрешности в реальных псевдодальностях, является центральной станцией с заданными координатами, а остальные приемники выполняют функции мобильных или пользовательских [21]. Уравнение псевдодальности имеет вид

$$PR = \rho + d_{\rho} + C * (dt - dT) + d_{ion} + d_{trop} + \varepsilon_{\rho} . \quad (1)$$

Параметры (1) перечислены в табл. 1. Реальное расстояние между GPS приемником и спутником рассчитывается как

$$\rho = \sqrt{(x - X)^2 + (y - Y)^2 + (z - Z)^2} , \quad (2)$$

где (X, Y, Z) и (x, y, z) – координаты спутника и приемника соответственно. Значение PRC рассчитывается как

$$PRC = \rho - PR . \quad (3)$$

В действительности значение PRC равно

$$PRC = -(d_{\rho} + d_{\rho SA} + C * (d_{TSA} + dt - dT) + d_{ion} + d_{trop} + \varepsilon_{\rho}) . \quad (4)$$

Полученное значение PRC вместе с рассчитанной на опорной станции RRC передается на станцию пользователя, и в соответствии с (5) вычисляется новое значение PRC:

$$PRC(t) = PRC(t_0) + RRC \times (t - t_0) . \quad (5)$$

Следовательно, PRC содержит скорость изменения ионосферной задержки (δI_s), тропосферной задержки (δT_s) во времени, которую можно описать как

$$RRC = -\delta I_s - \delta T_s . \quad (6)$$

Тогда как PRC в момент времени t_0 – это поправка псевдодальности, которая рассчитывается в опорной станции, RRC – это изменение PRC за определенное время. После устранения погрешности избирательного доступа не рекомендуется использовать RRC в сообщениях протокола RTCM, так как это только ухудшит точность [15]. Если значение RRC задается нулевым в протоколе RTCM [15], (5) трансформируется в

$$PRC(t) = PRC(t_0) . \quad (7)$$

Значения PRC используются в опорной станции в качестве входных данных модели предсказания для аппроксимирования ее будущих значений.

Т а б л и ц а 1

Параметры, используемые в (1)

Пара-метр	Описание	Пара-метр	Описание
PR	Наблюдаемая псевдодальность	dt	Погрешность часов спутника
ρ	Расстояние между приемником и спутником	dT	Погрешность часов приемника
d_{ρ}	Погрешность положения спутника	d_{ion}	Ионосферная погрешность вследствие запаздывания
d_{trop}	Тропосферная погрешность вследствие запаздывания	C	Скорость света
ε_{ρ}	Шум приемника и погрешности многолучевости	–	–

б) Протокол RTCM

Протокол RTCM был разработан специальной радиокомиссией для американских морских служб в 1990 г. и использовался в США. Передача данных производится в нем в двоичном или непрерывном режиме. Протокол состоит из нескольких сообщений. Главным из них является сообщение № 1, остальные получают от него признаки достоверности. Заголовок сообщения содержит тип сообщения, временные данные, характеристику опорной станции и длину сообщения. Текстовая часть содержит данные, специфические для каждого сообщения. Длина сообщения зависит от его типа. В данной работе используются сообщения № 1 из версии протокола 2.3. Важными параметрами здесь являются PRC и RRC. Также в сообщении используются модифицированный z-отсчет и номер спутника [22]. Приемник опорной станции использует двоичный протокол Motorola, имеющий разную длину для каждого сообщения [23]. Сообщение, которое конвертируется в протокол RTCM, называется корректирующим. Краткое название сообщения представляет собой входную PRC, длина сообщения – 52 байт.

2. Рекуррентная нейронная сеть

Рекуррентная нейронная сеть обладает важным преимуществом в части подготовки данных, которые могут быть использованы в будущем, в сравнении с упреждающей сетью. РНС обладает кратковременной памятью, которая обновляет входные данные вместе с сохраненной информацией о распространении. Наличие обратной связи в структуре позволяет системе производить обновления при обучении сети. РНС работает во временной области. В каждом временном блоке в сеть поступает входной вектор. Скрытый уровень обновляется при помощи нелинейной функции активации и использует ее для предсказания выходного сигнала. Такая модель не только способна хранить множество данных большого объема в скрытом слое, но и обладает значительными вычислительными возможностями. РНС может быть использована для реализации сложных предсказаний. В данной статье говорится об РНС с полными рекурсивными связями между скрытыми слоями. Эти связи учитывают влияние предыдущих измерений на текущие. Также существует полная связь между предыдущим и текущим скрытым слоем для оценки некоторой части текущего входного значения по предыдущим измерениям [8], [18]–[20].

в) Уравнения рекуррентной нейронной сети

Входными данными для РНС являются $PRC(t)$, $PRC(t-\Delta T)$, $PRC(t-2\Delta T)$... и $PRC(t-n\Delta T)$, выход – $PRC(t+\Delta T)$, где ΔT – интервал между измерениями. Сигнал, соответствующий нейронам РНС, описывается уравнением

$$\tau_i \dot{y}_i + y_i = \sigma(b_i + \sum_j w_{ij} y_j + \sum_j w_{ij}^{IN} I_j), i=1, \dots, n, \quad (8)$$

где τ_i – постоянные времени, σ – функция активации, b_i – систематическая погрешность, w_{ij} – веса выхода y_j от нейрона j , а w_{ij}^{IN} – веса внешнего входа, соответствующего входу I_j . $\dot{y}_i$ рассчитывается следующим образом:

$$\dot{y}_i \approx [y_i(t + \Delta t) - y_i(t)] / \Delta t, \quad (9)$$

где Δt – временной шаг. Функция активации определяется как

$$\sigma_i(s) = \tanh(\beta_i s), i = 1, \dots, n, \quad (10)$$

где β_i – постоянная. Время между двумя входами представлено ΔT , и выходной сигнал рассчитывается после временного шага. Количество шагов, обозначенное через N , равно

$$N = \Delta T / \Delta t. \quad (11)$$

Таким образом, внешние входы являются постоянными для N шагов, см. ниже. Следовательно, дискретизованное уравнение имеет вид

$$y_i(t + \Delta t) = y_i(t) + \Delta t / \Delta T [\sigma(b_i + \sum_j w_{ij} y_j(t) + \sum_j w_{ij}^{IN} I_j(t)) - y_i(t)]. \quad (12)$$

Выходные нейроны для $N-1$ временных шагов рассчитываются таким же образом. Прогноз на момент времени $(t + N\Delta t)$ вычисляется по следующему уравнению:

$$y_i(t + N\Delta t) = y_i(t + (N-1)\Delta t) + \Delta t / \Delta T [\sigma(b_i + \sum_j w_{ij} y_j(t + (N-1)\Delta t) + \sum_j w_{ij}^{IN} I_j(t)) - y_i(t + (N-1)\Delta t)]. \quad (13)$$

Структура РНС показана на рис. 1, где векторы представляют взвешенные связи, а нейрон №1 является выходным нейроном [26-24].

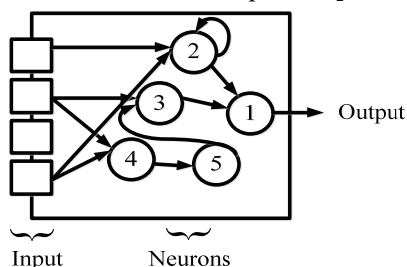


Рис. 1. Структура РНС (вход, нейроны, выход)

г) Обучение РНС с помощью эволюционных алгоритмов

К эволюционным алгоритмам относятся генетический алгоритм, генетическое программирование и эволюционные стратегии, которые часто используются для обучения РНС. Эти методы подходят для оптимизации, классификации и регрессии. В данной статье описывается эволюционная модель ГА. Основные этапы ГА включают тройные операции выбора, соединения и мутации. В процессе репродукции хромосомы с высокой приспособляемостью будут иметь шанс более высокой репликации в выбранной популяции. Это происходит благодаря процессу отбора. В процессе мутации за счет выбора фиксированного значения скорости мутации вырабатывается случайное число для всех разрядов популяции хромосом. Если сгенерированное случайное число меньше скорости мутации, значение разряда меняется, т.е. единица становится нулем или наоборот. При удовлетворении определенных критериев, таких как, например, количество поколений или среднее значение объектов популяции, генетический алгоритм заканчивается. В данной статье для обучения РНС используется улучшенный ГА. Основное различие между стандартным и улучшенным ГА состоит в отсутствии кроссовера в последнем. Добавляются структурные мутации, и скорость мутации меняется в зависимости от размера закодированной сети. В данной статье каждая хромосома состоит из одного генома, однако количество генов в

хромосоме и количество нейронов, формирующих РНС, может меняться. Основные операции ГА показаны на рис. 2 [27]-[30].

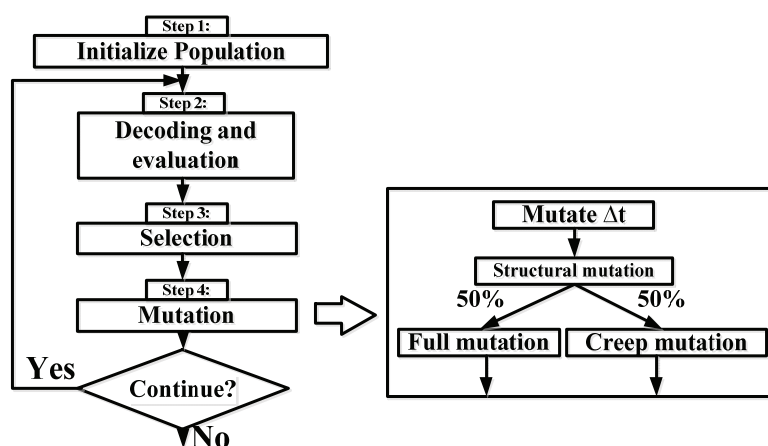


Рис. 2. Основные шаги генетического алгоритма
 Сверху вниз и слева направо: Шаг 1. Инициализация популяции
 Шаг 2. Декодирование и оценка
 Шаг 3. Отбор
 Шаг 4. Мутация
 Продолжить? Да/Нет
 Мутация Δt
 Структурная мутация
 Полная мутация/Медленная мутация

Кодирование хромосом происходит аналогично процессу, изображенному на рис. 3.

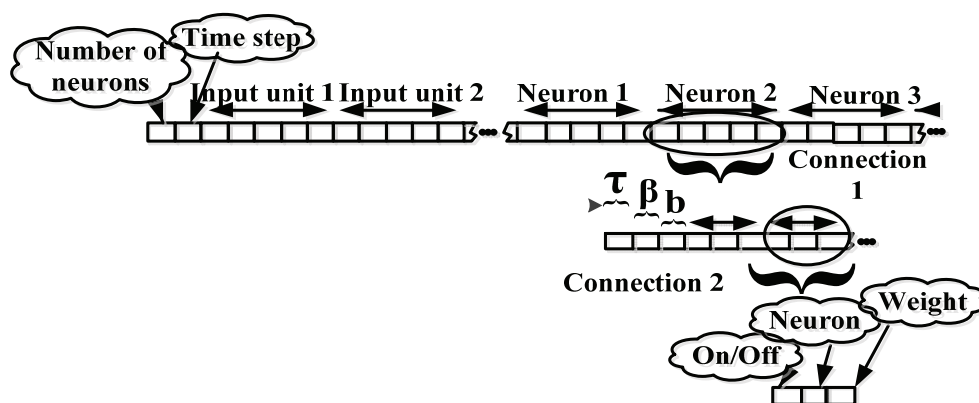


Рис. 3. Кодирование РНС
 Слева направо и сверху вниз: Количество нейронов, Временной шаг, Входной блок 1, Входной блок 2, Нейрон 1, Нейрон 2, Нейрон 3, Связь 1, Связь 2, Вес, Нейрон, Вкл/Выкл

Хромосомы, состоящие из генов, показаны с реальным значением в интервале $[-1 \dots 1]$. Количество нейронов в РНС определяется следующим уравнением:

$$n = |G_1| M_n, \quad (14)$$

где G_1 – первый ген хромосомы G , а M_n – максимальное количество нейронов. M_n имеет постоянное значение в течение процесса обучения. Временной шаг Δt определяется как

$$\Delta t = |G_2|, \quad (15)$$

где $|G_2| \geq 0.001$ и τ_i равно

$$\tau_i = |G_j|, \quad (16)$$

где $|G_j|$ больше 0.001, или, другими словами, τ_i будет задаваться равным 0.001.

$$\beta_i = C_s (G_j + 1). \quad (17)$$

Здесь C_s считается равным 2, т.о. β находится в интервале $[0, 2C_s]$. Уравнение для b_i дано ниже:

$$b_i = C_t G_j. \quad (18)$$

В этом уравнении C_t считается равным 2. В соответствии с приведенными выше уравнениями, веса находятся в интервале $[-2 \dots 2]$. Чтобы выбрать одно из образованных поколений, используется т.н. игра отбора (“selection game”). Количество объектов, случайным образом выбираемых из популяции, определяется как

$$n_t = \max(2, 0.15 n_{ind}), \quad (19)$$

где n_{ind} – размер популяции. Скорость мутации для каждого объекта рассчитывается в соответствии с

$$p_{mut} = 10 / N_G, \quad (20)$$

где N_G – количество генов, используемых в структуре РНС. Согласно рис. 3, используется два типа мутации.

При использовании полной формы мутации случайным образом выбирается один входной сигнал или нейрон. Случайно выбирается один ген, и происходит мутация. Новое значение мутировавшего гена случайно выбирается в интервале $[-1 \dots 1]$. В медленной форме мутации только один ген мутирует на хромосоме. Восходящая мутация рассчитывается следующим образом:

$$G_{new} = G_{old} (1 - 2rc + c), \quad (21)$$

где G – ген, r – случайное число между 0 и 1, c – постоянная скорости восхождения, которая обычно составляет 0,5. Временной шаг мутации равен

$$\Delta t_{new} = 1 / ((1 / \Delta t_{old}) \pm 1). \quad (22)$$

Также могут быть использованы структурные мутации. Скорость мутации определяется экспериментально. При скорости мутации $0.3p_{mut}$ сеть совершает нисходящую структурную мутацию (потеря нейрона). С другой стороны, при скорости мутации $0.3p_{mut}$ сеть расширится за счет добавления одного нейрона. Лучший объект в своем поколении копируется в неизменном виде в следующее поколение. Это обеспечивает высочайшую приспособляемость. Обычно в задачах регрессии используется среднеквадратическая погрешность (СКП) (23).

Низкие значения СКП говорят о пригодности данной модели предсказания.

$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^K (T_i - P_i)^2 / K} . \quad (23)$$

В (23) k – количество измерений, P_i и T_i – предсказанные и реальные значения i -го образца. $PRC(t)$, $PRC(t - \Delta T)$, $PRC(t - 2\Delta T)$... и $PRC(t - n\Delta T)$, как показано на рис. 1, являются входными данными для системы. На их основе будет производиться предсказание будущих значений PRC .

3. Реализация

Чтобы реализовать систему, изображенную на рис. 4, мы разместили опорную станцию на футбольное поле Университета Шахид Раджи. Опорная станция включает GPS приемник, ноутбук, радиопередатчик и необходимые антенны. Станция пользователя состоит из GPS приемника, радиоприемника и соответствующих антенн. Используемые модули показаны на рис. 5.

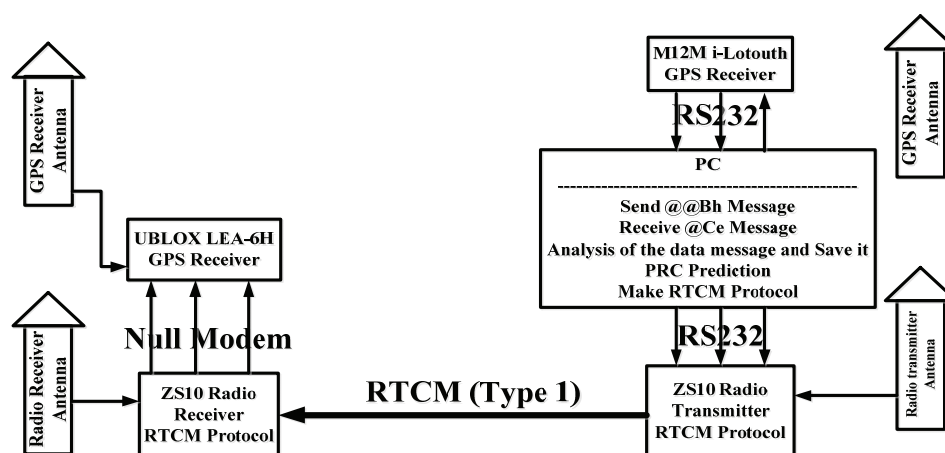


Рис. 4. Предлагаемая структура RTDGPS

Слева направо и сверху вниз: антенна приемника GPS, антенна радиоприемника, отправка сообщения, получение сообщения, анализ и сохранение информационного сообщения, предсказание PRC, выработка протокола RTCM, антенна радиопередатчика

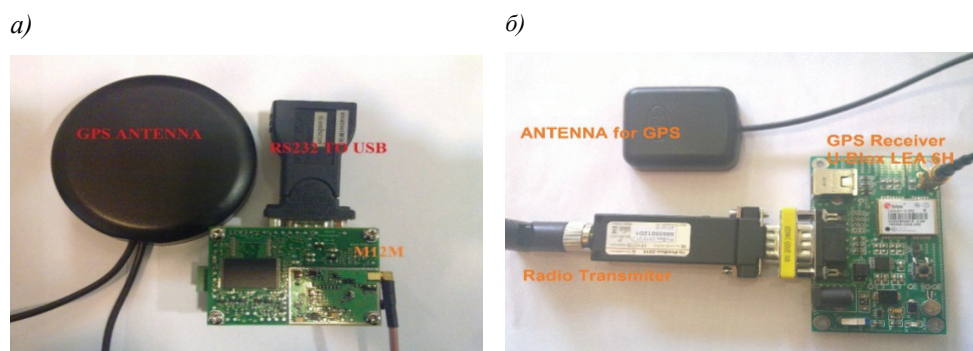


Рис. 5. Модуль, используемый для реализации RTDGPS:
а) опорная станция, б) станция пользователя

1. Опорная станция

Используется 12-канальный GPS приемник диапазона L1 M12M-i-Louth. Приемник работает по протоколам NMEA, RTCM и двоичному протоколу Motorola. Это также является особенностью при использовании опорной и пользовательской станции дифференциальной GPS и маршрутизации. Приемник использует два последовательных порта TTL. Поскольку ПК использует протокол связи RS232, а приемник GPS – протокол TTL, был разработан преобразователь RS232–TTL. Далее используется преобразователь RS232–USB, чтобы подключиться к ноутбуку. В систему встроен порт ввода-вывода для связи с процессором с помощью преобразователя TTL–RS232, а также входной порт для применения протокола RTCM. Точность приемника в автономном режиме составляет 5 м. Радиопередатчик использует порт RS232. Передатчик способен как отправлять, так и получать поправки дифференциальной GPS. Применяется радиопередатчик модели ZS10, который использует порт RS232 и протокол ZigBee. Чтобы подсоединить радиопередатчик к ноутбуку, используется преобразователь RS232–USB. В данной работе используется ноутбук с процессором Intel Core i5. Сначала при помощи AT-команд настройки опорного приемника задаются так, чтобы он работал как базовая станция. Маска по возвышению спутников настроена на 10°. Тропосферные и ионосферные поправки заданы равными нулю. Положение опорной станции задано параметрами X , Y и Z , т.о. можно рассчитать точные координаты PRC относительно этого положения. После подстройки положения опорной станции используется программа на языке Си с целью определения входного порта для данных поправок, выходного порта и скорости передачи данных.

2. Станция пользователя

На станции пользователя применяется радиоприемник, аналогичный опорному, и GPS приемник модели U-BLOX LEA6H. Полученные данные по протоколу RTCM посылаются в порт RS232 GPS приемника посредством нуль-модема. Используя USB порт приемника, можно отображать местоположение на ноутбуке. Установленное в приемнике комплексное ПО под названием u-center обеспечивает большой объем данных для пользователя. Приемник U-BLOX LEA 6H содержит внутреннее ПО 7.03 и работает с протоколами NMEA, RTCM и двоичным UBX. Технические данные приемника: наличие 50 каналов, способность к маршрутизации, данные о скорости и положении, вход дифференциальной GPS и высокая точность позиционирования. В приемнике используется C/A код и частота несущей L1. Точность приемника составляет 3 м [32].

4. Результаты экспериментальных исследований

Испытания проводились для определения следующих параметров:

- точность алгоритмов прогноза для отдельных спутников,
- точность позиционирования системы RTDGPS при применении РНС-ГА.

д) Результаты работы алгоритма прогноза для отдельных спутников

Для определения точности алгоритма прогноза временной шаг алгоритма ΔT был принят за 5 с. На рис. 6 показано спрогнозированное значение PRC для спутника № 3 при помощи алгоритма РНС-ГА. Видно, что алгоритм прекрасно справился с прогнозом значений PRC на один шаг вперед для 1000 значений

PRC. Погрешность прогноза на один шаг вперед показана на рис. 7. Из рисунка следует, что она может меняться от максимума до минимума – от 0,1 м до -0,2 м. Прогноз значений PRC и погрешность алгоритма на два шага вперед показаны на рис. 8 и 9. Погрешность прогноза на три шага вперед для спутников № 17 и 23 показана на рис. 10 и 11. В табл. 2 показаны статистические свойства погрешности прогноза для следующих 5 и 10 с для 3000 значений PRC. СКП предсказания на 5 с вперед составляет ок. 0,07 м. Если задержка передачи поправки от опорной станции пользователю достигает 10 с, погрешность прогноза составит почти 0,12 м. В ходе практических испытаний проверялось, как применение алгоритма РНС-ГА влияет на точность RTDGPS.

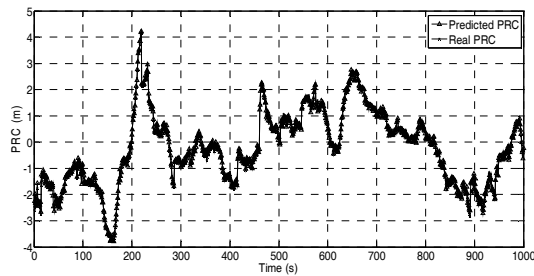


Рис. 6. Прогноз PRC на 1 шаг вперед для спутника № 3

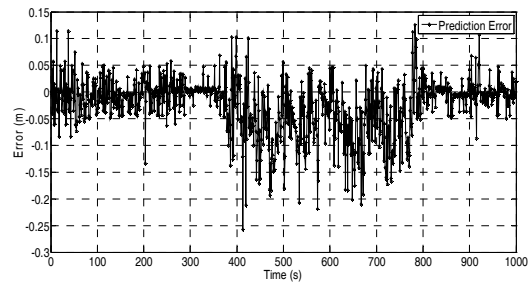


Рис. 7. Погрешность прогноза PRC на 1 шаг вперед для спутника № 3

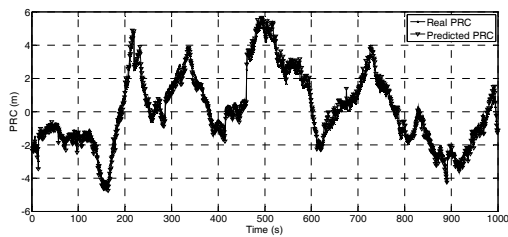


Рис. 8. Прогноз PRC на 2 шага вперед для спутника № 12

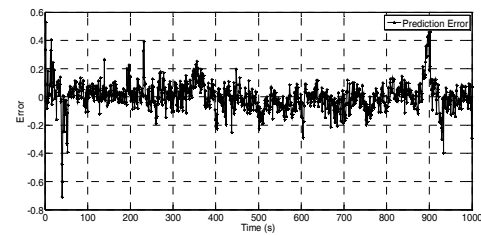


Рис. 9. Погрешность прогноза PRC на 2 шага вперед для спутника № 12

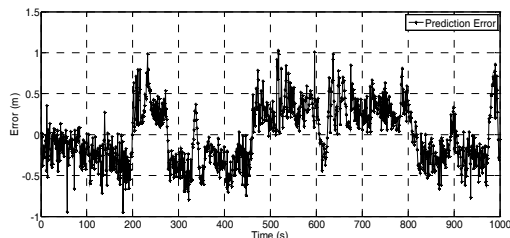


Рис. 10. Погрешность прогноза PRC на 3 шага вперед для спутника № 17

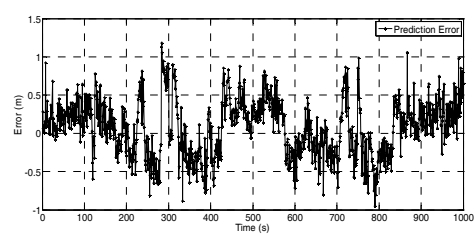


Рис. 11. Погрешность прогноза PRC на 3 шага вперед для спутника № 23

е) Экспериментальное исследование результатов позиционирования

В ходе испытания задавалась нулевая задержка, хотя задачей теста было практическое испытание системы. Возможные задержки, связанные с реальной работой системы, должны компенсироваться моделью прогноза.

Чтобы определить точность системы, пользовательская часть системы

RTDGPS была размещена в GPS лаборатории Университета Шахид Раджи. Точные координаты пользовательской станции определены с помощью 18000 измерений за 5 часов в автономном режиме:

$$(x = 3226138.45, y = 4054133.32, z = 3709400.74) .$$

Опорная станция была размещена на футбольном поле Университета, т.е. в статической точке. Координаты опорной станции

$$(x = 3225995.39, y = 4054636.80, z = 3709429.64) .$$

После установки начальных настроек в двух режимах генерируется протокол RTCM с RRC = 0 [15]. Частота поправок RTCM (скорость двоичной передачи данных) составляет 9600 бит/с. В первом режиме используется стандартный протокол RTCM (RRC=0), а во втором – алгоритм предсказания РНС-ГА. Чтобы использовать сообщение № 1 протокола RTCM и активировать режим дифференциальной GPS, требуется по крайней мере четыре спутника общего пользования. В течение большинства периодов выборки на обеих станциях было доступно 8 общих спутников. Сообщение № 1 отправлялось на станцию пользователя с максимально доступной скоростью и без преднамеренных задержек. В случае, когда алгоритм предсказания не используется на опорной станции, срок ожидания дифференциальной GPS в приемнике пользователя устанавливается на уровне 60 с.

Т а б л и ц а 2

Статистические характеристики погрешностей предсказания

Задержка PRC	№ спутника	Max	Min	Среднее	Дисперсия	СКП
5 с	3	0,2651	0	0,0100	0,024	0,0791
	6	0,2531	0	0,0114	0,0227	0,0773
10 с	3	0,7037	0,00001	0,0982	0,0830	0,1251
	6	0,6828	0,000012	0,0891	0,0697	0,1399

Другими словами, если по какой-либо причине новое значение PRC не поступает на станцию пользователя в течение 60 с., приемник использует предыдущие значения PRC вместо текущих. При отсутствии сигнала в течение 60 с. пользовательский приемник переходит с режима дифференциальной GPS на стандартный режим GPS с более высокой погрешностью позиционирования. При активации алгоритма РНС-ГА на опорной станции на станции пользователя задается нулевой срок ожидания дифференциальной GPS. Точность одного GPS приемника LEA-6H, который размещен в той же точке на футбольном поле и не получает никаких данных от опорной станции, составляет около 3,58 м. На рис. 12 показаны результаты позиционирования RTDGPS с помощью алгоритма РНС-ГА. Видно, что наблюдения системы концентрируются около средней точки (реальной точки), следовательно, разброс в дифференциальном режиме меньше. На рис. 13 показаны трехмерные погрешности наблюдения положения относительно реального положения станции пользователя. Можно увидеть, что погрешность положения в основном сконцентрирована между максимумом и минимумом от 0,5 до -0,5. Погрешность наблюдения системы RTDGPS без использования алгоритма предсказания показана на рис. 14.

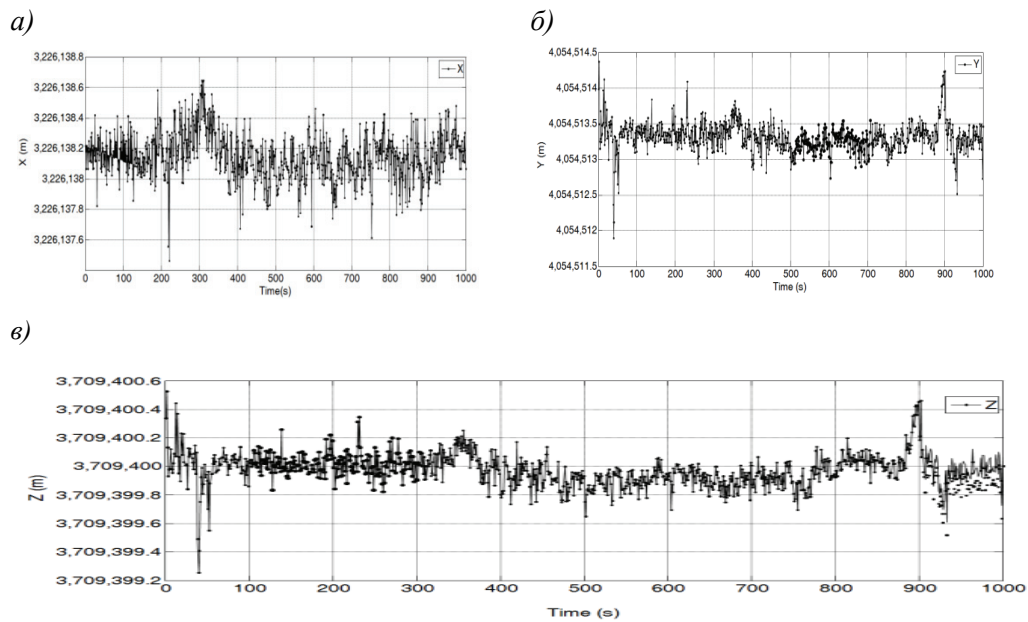


Рис. 12. Результаты позиционирования приемников пользователя с помощью предлагаемой системы RTDGPS

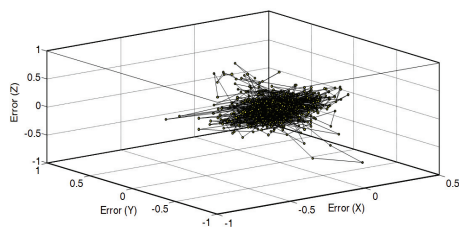


Рис. 13. Трехмерная погрешность позиционирования приемников пользователя при использовании алгоритма прогноза

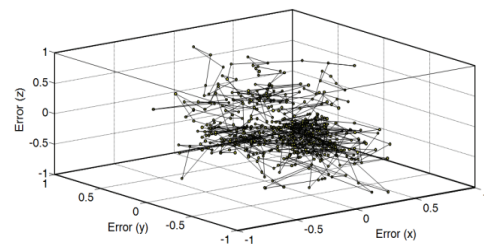


Рис. 14. Трехмерная погрешность позиционирования приемников пользователя без использования алгоритма прогноза (RRC=0)

Очевидно, дисперсия наблюдений в данном случае выше, чем в первом, и трехмерная погрешность наблюдения относительно реального положения пользователя подтверждает этот факт. В табл. 3 приведены статистические характеристики пространственной погрешности наблюдения относительно реальной точки для стандартного протокола RTDGPS и для протокола RTDGPS с использованием алгоритма РНС-ГА для 5 ч наблюдений. СКП при использовании RTDGPS и алгоритма РНС-ГА составила 0,3 м, а при использовании стандартного протокола – 0,42 м, т.е. погрешность местоположения уменьшается на 0,12 м. Эффект применения алгоритма прогноза более очевиден при увеличении времени отсутствия приема сигнала на опорной станции. Для компенсации погрешности задержки используются полученные ранее данные. Однако при долговременном их использовании погрешность только увеличится. В данном случае для снижения погрешности позиционирования используется алгоритм РНС-ГА.

Статистические характеристики погрешностей прогноза

Параметр	RTDGPS с РНС-ГА			RTDGPS без РНС-ГА		
	x	y	z	x	y	z
Max	0,6	0,8	0,6	1	1	0,9
Min	0	0	0	0	0	0
Среднее	0,10	0,11	0,12	0,20	0,24	0,25
СКП	0,29	0,28	0,30	0,43	0,42	0,44

Выводы

Статья посвящена разработке и апробации процедуры прогноза RTDGPS-данных опорной станции на основе рекуррентных нейронных сетей и генетического алгоритма. Алгоритм использовался для предсказания будущих значений поправок псевдодальности. СКП алгоритма прогноза PRC составила 0,12 м. Показано, что применение алгоритма РНС-ГА повышает точность позиционирования. Эффект применения предложенного алгоритма на точность позиционирования становится более очевиден при возникновении задержки в поступлении поправок к пользователю. Для обеспечения надежности системы RTDGPS наибольшее значение имеет последовательная и бесперебойная передача сообщения № 1. Применение алгоритма РНС-ГА позволяет снизить СКП позиционирования с 0,42 до 0,3 м.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Seong Y. Ch., and Wan S. Ch.** Performance enhancement of low-cost land navigation system for location-based service, *ETRIJ Journal*, 2006, vol. 28, no. 2, pp. 131-144.
2. **Bock H., Dach R., Yoon Y., and Montenbruck O.** GPS clock correction estimation for near real-time orbit determination applications, *AEROSP SCI TECHNOL*, 2009, vol. 13, no. 7, pp. 415–422.
3. **Mosavi M. R., Mohammadi K., and Refan M. H.** A new approach for improving of GPS positioning accuracy by using an adaptive neurofuzzy system, before and after S/A is turned off,” *IJEEE*, 2004, vol. 15, no. 1, pp. 95-108.
4. **Kawamura K. and Tanaka T.** Study on the improvement of measurement accuracy in GPS, *SICE-ICASE Int. Joint Conf.*, 2006, pp. 1372-1375.
5. **McDonald K. D.** The modernization of GPS: plans, new capabilities, and the future, *JGPS*, 2002, vol. 1, no. 3, pp. 1-17.
6. **Mohasseb M., Rabbany A., Alim O., and Rashad R.** DGPS correction prediction using artificial neural networks, *Journal of Navigation*, 2007, vol. 60, no. 2, pp. 291-301.
7. **Zhang J., Zhang J., Zhang K., Grenfel R., Deakin R.** GPS satellite velocity and acceleration determination using the broadcast ephemeris, *Journal of Navigation*, 2006, vol. 59, pp. 293–305.
8. **Mosavi M. R.** Comparing DGPS corrections prediction using neural network, fuzzy neural network, and Kalman filter, *GPS Solut.*, 2006, vol. 10, no. 2, pp. 97-107.
9. **Mosavi M. R.** A wavelet based neural network for DGPS corrections prediction, *WSEAS transactions on systems, Journal of Intelligent & Fuzzy Systems: Applications in Engineering and Technology*, 2004, vol. 3, no. 10, pp. 3070-3075.
10. **Mosavi M. R.** Estimation of pseudo-range DGPS corrections using neural networks trained by evolutionary algorithms, *RIEE*, 2010, vol. 5, no. 6, pp. 2715-272.
11. **Jwo D., Lee, T., and Tseng Y. W.** ARMA neural networks for predicting DGPS pseudo range correction, *Journal of Navigation*, 2004, vol. 57, no. 2, pp. 275–28.
12. **Geng Y.** Online DGPS correction prediction using recurrent neural networks with unscented Kalman filter, *International Global Navigation Satellite Systems Society IGNSS symposium*, the University of New South Wales, Sydney, Australia, 2007.
13. **Indriyatmoko A., Kang T., Jae Lee J., Jee G., Cho Y. B., and Kim J.** Artificial neural network for predicting DGPS carrier phase and pseudo-range correction, *GPS Solut.*, 2008, vol. 12, no. 4, pp. 237-247.

14. **Yinglei X., Li Q., Xie S., and Zhang L.** Study on algorithm and communication protocol of differential GPS positioning based on pseudo range, International Forum on Information Technology and Applications, 2009.
15. **Refan M. H., Dameshghi A., and Kamarzarrin M.** Improving RTDGPS accuracy using hybrid PSOSVM prediction model, Aerospace Science and Technology, 2014, vol. 37, pp. 55–69.
16. **Park B., Kim J., and Kee J.** RRC unnecessary for DGPS messages, IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst., 2006, vol. 42, no. 3, pp. 1149–1160.
17. **Aris W. A., Musa T. A., Omar K., Abdullah K. A., and Othman R.** Performance of local DGPS without RRC in equatorial area, International Symposium on GPS/GNSS, Taipei, Taiwan, 2010.
18. **Bod'en M.** A guide to recurrent neural networks and backpropagation, In the Dallas project, SICS Technical Report, 2002.
19. **Cai X., Zhang N., Venayagamoorthy G. K., and Wunsch D. C.** Time series prediction with recurrent neural networks trained by a hybrid PSO-EA algorithm, NEUROCOMPUTING Journal, 2007, vol. 70, no. 13, pp. 2342–2353.
20. **Graves A. and Schmidhuber J.** Offline handwriting recognition with multi-dimensional recurrent neural networks, in Advances in Neural Information Processing Systems, 2009.
21. **Wells D., Beck N., Delikaraoglou D., Kleusberg A., Krakiwsky E. J., Lachapelle G., Langley R. B., Nakiboglu M., Schwarz K. P., Tranquilla J. M., and Vanicek P.** Guide to GPS positioning. Canadian GPS associates, Fredericton N. B. Canada, 1986.
22. **RTCM Special Committee No. 104.** “RTCM recommended standards for differential NAVSTAR GPS service”. Radio Technical Committee for Maritime Services. Paper 134-89/SC104- 68. Washington DC (USA), 1990.
23. **I-Lotus GPS Products - M12M User's Guide.**
24. **Giles C. L., Lawrence S., and Tsoi A. C.** Noisy time series prediction using a recurrent neural network and grammatical inference, JMLR, 2001, vol. 44, no. 2, pp. 161–183.
25. **Pettersson J. and Wahde M.** Generating balancing behavior using recurrent neural networks and biologically inspired computation methods, IEEE Transactions of Evolutionary Computation, Sep. 2003.
26. **Williams R. J., and Zipser D.** A learning algorithm for continually running fully recurrent neural networks, Neural Computation, 1989, vol. 1, no. 2, pp. 270–280.
27. **Dharmistha M. S. and Vishwakarma D.** Genetic algorithm based weights optimization of artificial neural network, International IJAREEIE, 2012, vol. 3, no. 3, pp. 206–211, [Online]. Available: <http://www.ijareeie.com/volume-1-issue-3>
28. **Changyu S., Lixia W., and Qian L.** Optimization of injection molding process parameters was using combination of artificial neural network and genetic algorithm method, J MATER PROCESS TECH, 2007, vol.183, no. 2, pp. 412–418.
29. **Leung H. F., Lam H. K., Ling S. H., and Tam P. K. S.** Tuning of the structure and parameters of a neural network using an improved genetic algorithm, IEEE Trans. Neural Networks, vol.1, pp. 79–88, 2003.
30. **Sara G. S., Devi S. P., and Sridharan D.** A genetic-algorithm-based optimized clustering for energy-efficient routing in MWSN, ETRI Journal, 2012, vol. 34, no. 6, pp. 922–931.
31. **ZigBee Serial Adapter ProBee-ZS10 User Guide** Sena Technologie.
32. **u-blox 6 Receiver Description** Including Protocol Specification.

Abstract. It has been suggested to compensate the signal absence and transmission delay of differential corrections in the real-time system (Real Time Differential GPS, RTDGPS) by estimating future values of the pseudorange corrections (PRC). Recurrent neural network (RNN) and genetic algorithm (GA) are used for the estimation. RTDGPS system using two inexpensive receivers in reference and user stations has been considered. Simulation and experimental results presented indicate that predicting the PRC future values improves RTDGPS accuracy.

Keywords: recurrent neural networks, genetic algorithm, differential corrections, pseudorange, GPS

Материал поступил 16.09.2014