

УДК 550.37

DOI: 10.33764/2618-981X-2019-1-1-44-53

ВОССТАНОВЛЕНИЕ ТРАЕКТОРИИ ДВИЖЕНИЯ ЦЕНТРОВ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ АНТЕНН ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СКАНИРУЮЩЕЙ СИСТЕМЫ

Станислав Олегович Шевчук

Российский институт радионавигации и времени, 192012, Россия, г. Санкт-Петербург, пр. Обуховской Обороны, 120ЕЦ, кандидат технических наук, руководитель проектного направления, тел. (903)936-78-53, e-mail: staspp@211.ru

Вячеслав Николаевич Никитин

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, кандидат технических наук, доцент кафедры фотограмметрии и дистанционного зондирования, тел. (913)712-37-50, e-mail: vslav.nikitin@gmail.com

Николай Сергеевич Косарев

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, кандидат технических наук, доцент кафедры космической и физической геодезии, тел. (913)706-91-95, e-mail: kosarevnsk@yandex.ru

Александр Владимирович Куклин

ЗАО «Аэрогеофизическая разведка», 630007, Россия, г. Новосибирск, ул. Октябрьская магистраль, 4, оф. 1207, ведущий инженер, тел. (923)246-04-56, e-mail: kuklin@eml.ru

Кирилл Владимирович Киселев

ЗАО «Аэрогеофизическая разведка», 630007, Россия, г. Новосибирск, ул. Октябрьская магистраль, 4, оф. 1207, инженер-геофизик, тел. (913)203-92-41, e-mail: kiselev@aerosurveys.ru

В статье приведен обзор проблемы выполнения редукиций при геодезическом обеспечении электромагнитного сканирования. Даны возможные методы решения. Часть методов реализована в авторском программном обеспечении RouteNav.

Ключевые слова: ГНСС, электромагнитное сканирование, геодезическое обеспечение, геофизика, редукиции.

REDUCTION OF GEOPHYSICAL ANTENNAS TRAJECTORY FOR ELECRO-MAGNETIC SCANNING SYSTEM

Stanislav O. Shevchuk

Russian Institute of Radionavigation and Time, 120EC, Prospect Obukhovskoy Oborony St., Saint-Petersburg, 192012, Russia, Ph. D., Project Manager, phone: (903)936-78-53, e-mail: staspp@211.ru

Vyacheslav N. Nikitin

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 10, Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108, Russia, Ph. D., Associate Professor, Department of Photogrammetry and Remote Sensing, phone: (913)712-37-50, e-mail: vslav.nikitin@gmail.com

Nikolay S. Kosarev

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 10, Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108, Russia, Ph. D., Associate Professor, Department of Space and Physical Geodesy, phone: (913)706-91-95, e-mail: kosarevnsk@yandex.ru

Alexander V. Kuklin

«Aerogeophysical surveys» company, 4, Oktyabr'skaya Magistral' St., Novosibirsk, 630007, Russia, Leading Engineer, phone: (923)246-04-56, e-mail: kuklin@eml.ru

Kirill V. Kiselev

«Aerogeophysical surveys» company, 4, Oktyabr'skaya Magistral' St., Novosibirsk, 630007, Russia, Engineer-Geophysicist, phone: (913)203-92-41, e-mail: kiselev@aerosurveys.ru

The article considers the problems of geodetic reductions in geodetic support of electromagnetic geophysical scanning. Some of the possible ways of solving the issues are proposed and implemented with software RouteNav made by the authors.

Key words: GNSS, electro-magnetic scanning, geodetic support, geophysics, reductions.

Навигационно-геодезическое обеспечение является неотъемлемой частью сложного технологического процесса по выполнению электромагнитного сканирования (ЭМС), которое включает:

– топографо-картографическое обеспечение (подбор необходимых навигационных карт и топографической основы, выбор пунктов ГГС для точного позиционирования и т. п.);

– навигационное обеспечение ЭМС (контроль выдерживания профилей в реальном времени по определяемым координатам измерителя и проектным координатам точек профилей);

– геодезическое обеспечение (апостериорное получение точных координат пунктов измерений – фактического местоположения измерителя для обработки геофизических измерений) [1].

В настоящее время к навигационно-геодезическому обеспечению (НГО) ЭМС, выполняемого с помощью ГНСС-технологий, ставятся все более жесткие точностные требования [2–3]. Так для обеспечения детальной съемки (крупнее масштаба 1 : 10 000) применяется только фазовая ГНСС-аппаратура геодезического класса, обеспечивающая миллиметровую точность определения координат [4–6]. Повышение точности, а также специфика выполнения электромагнитного сканирования (залесенность, сложность рельефа и др.) приводит к ряду проблем навигационно-геодезического обеспечения [7]. В статье [1] авторами выделены четыре основные проблемы НГО: неопределенность требований к точности измерения координат при геодезическом обеспечении ЭМС, обеспечение точности геодезического обеспечения в условиях проведения ЭМС, понижение точности за счет неучета или частичного учета элементов редукации, отсутствие регламентирующей документации по навигационному обеспечению ЭМС и контрольной оценке результатов ЭМС. Решение этих проблем позволит достичь необходимой точности навигационно-геодезического обеспечения при выполнении электромагнитного сканирования.

Целью настоящей статьи является рассмотрение варианта решения третьей проблемы навигационно-геодезического обеспечения электромагнитного сканирования, а именно, понижение точности за счет неучета или частичного учета элементов редукации.

Рассмотрим специализированный измерительный комплекс, с помощью которого выполняется электромагнитное сканирование [8, 9]. Измерительный комплекс включают в себя контуры излучающих и приемных антенн, причем количество приемных антенн может быть более одной, а сами антенны могут выноситься на расстояние нескольких метров друг от друга. На рис. 1 представлен вариант измерительного комплекса ЭМС.



Рис. 1. Пример измерительного комплекса ЭМС (буксируемая приемно-генераторная конструкция)

Вследствие невозможности совмещения антенны ГНСС-приемника с центрами измерительных антенн сканирующих систем, их использование сопряжено с проблемой редукации измерений – переходом от измеренных координат и высот ГНСС-антенны к центрам измерительных антенн комплексов ЭМС. При этом в зависимости от варианта расположения антенн (одна, две или три антенны) будут использоваться различные методы учета элементов редукации.

В [1] приведен метод учета элементов редукации в случае размещения одной ГНСС-антенны на генераторно-измерительном комплексе. Метод учета элементов редукации для двух ГНСС-антенн сложнее. Для пересчета координат в этом случае должны быть измерены элементы редукации U_i , V_i – рас-

стояния антенны ГНСС-приемника от антенны i вдоль и поперек главной (продольной) оси генераторного контура, вдоль которой должна осуществляться его переноска, а также разность высоты антенны спутникового приемника и высоты приемной антенны электромагнитной системы при ее горизонтальном положении.

На рис. 2 приведена схема установки ГНСС-аппаратуры на переносную ЭМС-платформу с двумя приемными антеннами.

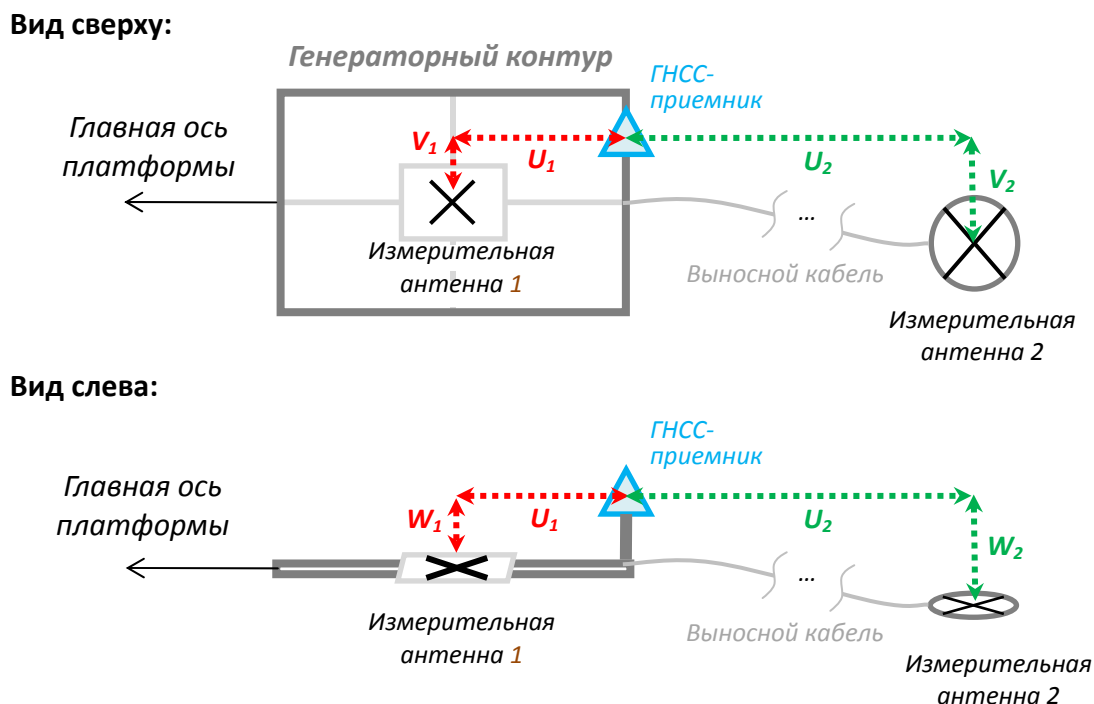


Рис. 2. Вариант схемы установки антенны ГНСС-приемника на переносную ЭМС-платформу

На практике, для упрощения расчетов, при установке ГНСС-приемника стараются обеспечить его соосность с измерительным центром антенны 1 вдоль главной оси платформы, т. е. равенства $V_1 = 0$. Кроме того, антенна может быть вынесена на переднюю сторону платформы.

Для восстановления точек траектории измерительных антенн подобных систем используются следующие формулы:

$$\begin{aligned}
 X_{Ц} &= X_A + \Delta X; \\
 Y_{Ц} &= Y_A + \Delta Y; \\
 H_{Ц} &= H_A + \Delta H,
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

где $X_{Ц}, Y_{Ц}, H_{Ц}$ – координаты и высоты точки центра измерительной антенны;
 $X_{А}, Y_{А}, H_{А}$ – координаты и высоты точек антенны ГНСС-приемника;
 $\Delta X, \Delta Y, \Delta H$ – поправки (смещения), вычисляемые в зависимости от метода редукции.

Для приемной антенны 1 (см. рис. 2), находящейся на жестком контуре вместе с антенной ГНСС-приемника (т. е. при сохранении величин U, V, W неизменными), будет справедлива следующая строгая формула редукции:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta H \end{bmatrix} &= \mathbf{R} \begin{bmatrix} U \\ V \\ W \end{bmatrix} = \mathbf{R}_Z \mathbf{R}_Y \mathbf{R}_X \begin{bmatrix} U \\ V \\ W \end{bmatrix} = \\ &= \begin{bmatrix} \cos \psi & -\sin \psi & 0 \\ \sin \psi & \cos \psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & \sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta & 0 & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \varphi & -\sin \varphi \\ 0 & \sin \varphi & \cos \varphi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U \\ V \\ W \end{bmatrix}, \end{aligned} \quad (2)$$

где ψ, θ и φ – углы пространственной ориентации платформы курса, тангажа и крена (Yaw, Pitch, Roll).

Для определения углов пространственной ориентации платформы может использоваться ИНС, например [10], однако сложность реализации такого способа привела к появлению упрощенного подхода. Так как при переносе платформы, ее продольный и поперечный наклон не превышают $5-10^\circ$, ими можно пренебречь ($\theta = 0$; $\varphi = 0$). При данном допущении поправки примут следующий вид:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \end{bmatrix} &= \mathbf{R}_Z \begin{bmatrix} U \\ V \\ W \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \psi & -\sin \psi & 0 \\ \sin \psi & \cos \psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U \\ V \\ W \end{bmatrix} = \\ &= \begin{bmatrix} U \cos \psi + V \sin \psi \\ U \sin \psi - V \cos \psi \\ W \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (3)$$

Задача определения угла курса ψ может быть решена установкой пары ГНСС-приемников или приемника с двумя ГНСС-антеннами [11].

При установке антенн ГНСС-приемников А и В на одинаковом расстоянии вдоль или поперек главной оси платформы можно получить угол ψ из разности их координат (рис. 3).

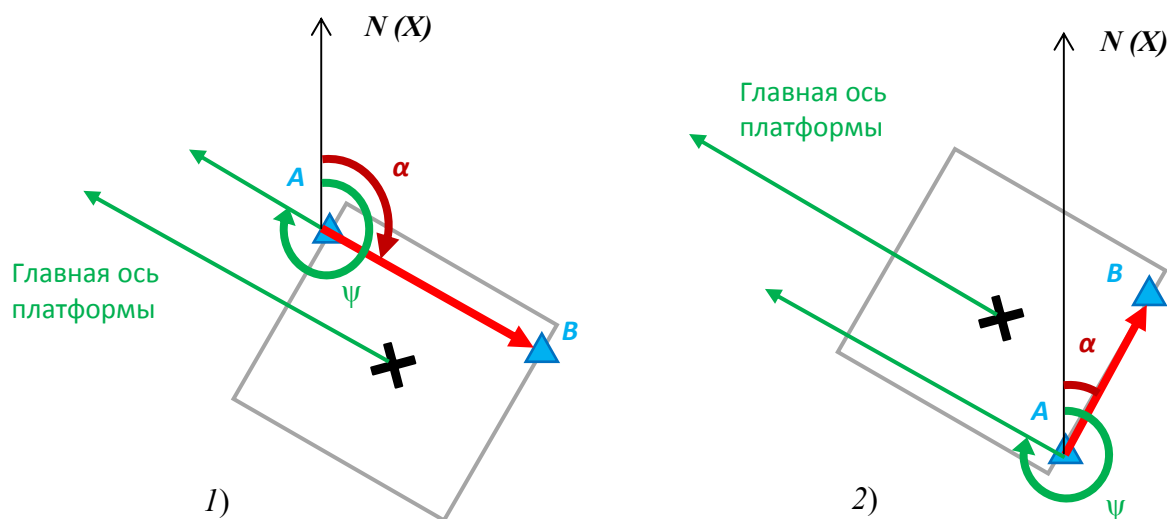


Рис. 3. Варианты расположения пары антенн ГНСС-приемников для определения курса – вдоль (1) и поперек главной оси платформы (2)

Для вариантов 1) и 2), приведенных на рис. 3, курс может быть получен по формулам:

$$\begin{aligned}
 1) \quad \psi &= \alpha + \pi; \\
 2) \quad \psi &= \alpha - \frac{\pi}{2}; \\
 \alpha &= \operatorname{arctg} \left(\frac{Y_{A2} - Y_{A1}}{X_{A2} - X_{A1}} \right).
 \end{aligned} \tag{4}$$

Если упрощенно принять соответствие главной оси платформы направлению ее движения, то курс можно восстановить из смежных по времени точек траектории (эпох), полученных одним ГНСС-приемником (рис. 4).

В этом случае угол курса определяется простой формулой:

$$\psi = \operatorname{arctg} \left(\frac{Y_i - Y_{i-1}}{X_i - X_{i-1}} \right). \tag{5}$$

Данный подход, несмотря на минимальные требования к составу аппаратуры и простую реализацию, требует у исполнителей обязательного следования условию – выдерживать ось платформы по направлению движения. Отклонения от данного условия неминуемо ведет к погрешностям:

$$\Delta_{XY} \approx 2\sqrt{U^2 + V^2} \sin(\Delta\psi / 2), \tag{6}$$

где Δ_{XY} – погрешность определения планового положения центра приемной антенны платформы;

$\Delta\psi$ – несоответствие полученного угла курса фактическому.

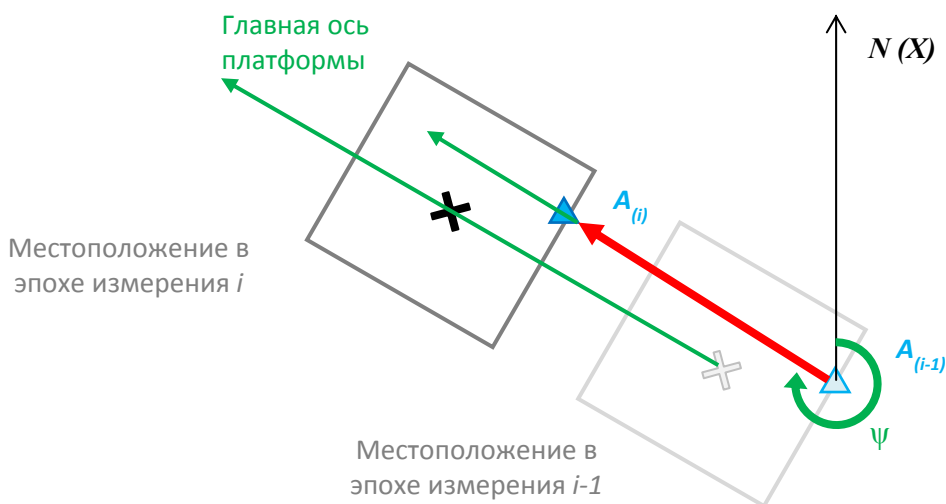


Рис. 4. Варианты расположения пары антенн ГНСС-приемников для определения курса – вдоль (слева) и поперек главной оси платформы (справа)

Формулы (1)–(6) применимы, в первую очередь к антенне 1 (см. рис. 2). Антенна 2, в отличие от антенны 1, имеет переменные элементы редукиции, из-за чего закономерности ее смещения относительно антенны ГНСС-приемника сложнее.

Если при выполнении съемки стараться выдерживать вторую антенну вдоль главной оси платформы, к ней так же будут применимы формулы, приведенные выше. Однако это условие, как правило, не выдерживается.

Пути определения положения измерительной антенны 2 могут быть следующие:

- а) принятие выносного кабеля за прямую линию и редукиция по формулам (1)–(6);
- б) установка второго ГНСС-приемника в непосредственной близости к антенне 2;
- в) принятие условия, что антенна следует точно по следу основной антенны.

Последний подход («по следу») подразумевает, что траектория центра выносной антенны 2 полностью повторяла путь центра основной антенны 1 (рис. 5).

При использовании данного метода величина расстояния вдоль оси платформы U откладывается по траектории, в то время как поперечный сдвиг V откладывается от вектора, соединяющего точки смежных эпох, между которыми оказывается предполагаемое местоположение выносной антенны. Большинство из описанных алгоритмов реализовано в утилите RouteEditor, входящей в программное обеспечение RouteNav [12–14].

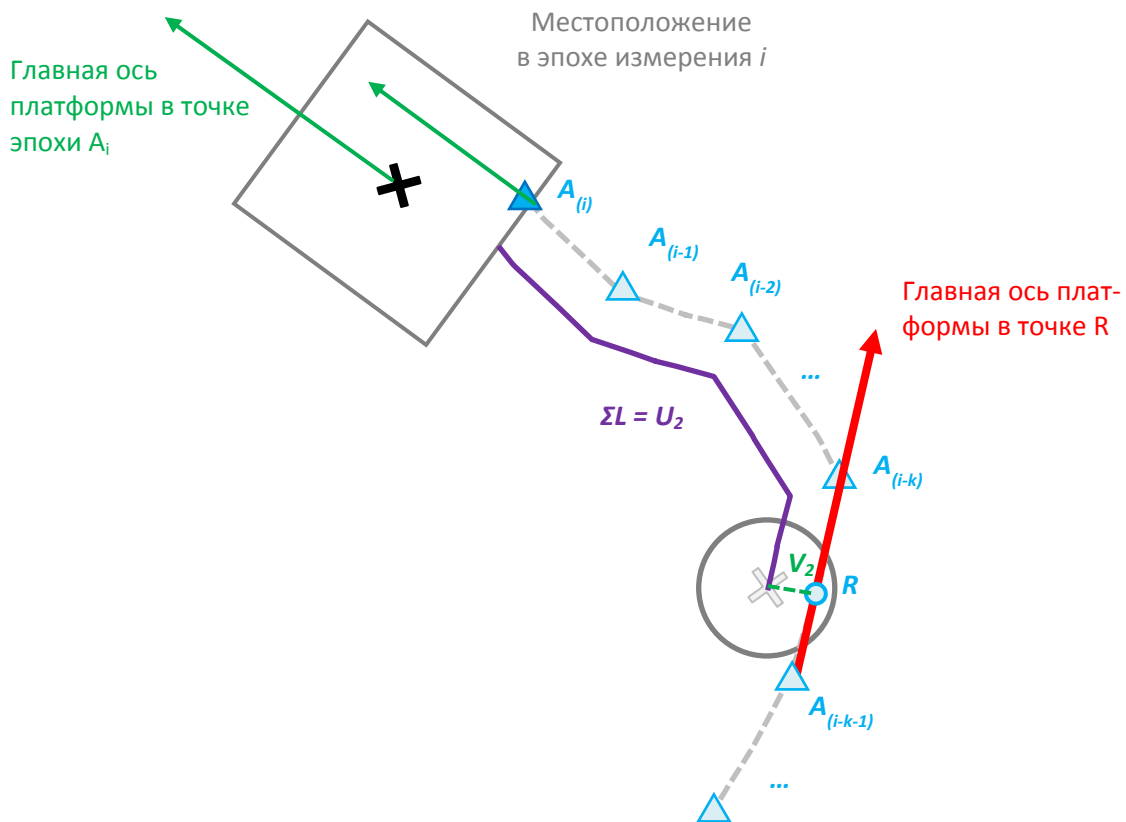


Рис. 5. Восстановление траектории «по следу»

В частности, чтобы автоматически получить редуцированную траекторию по формулам (6) необходимо указать величины редукции по осям U , V , W , выбрать метод фильтрации измерений (для исключения шума в определении курса) и тип применяемых формул (рис. 6).

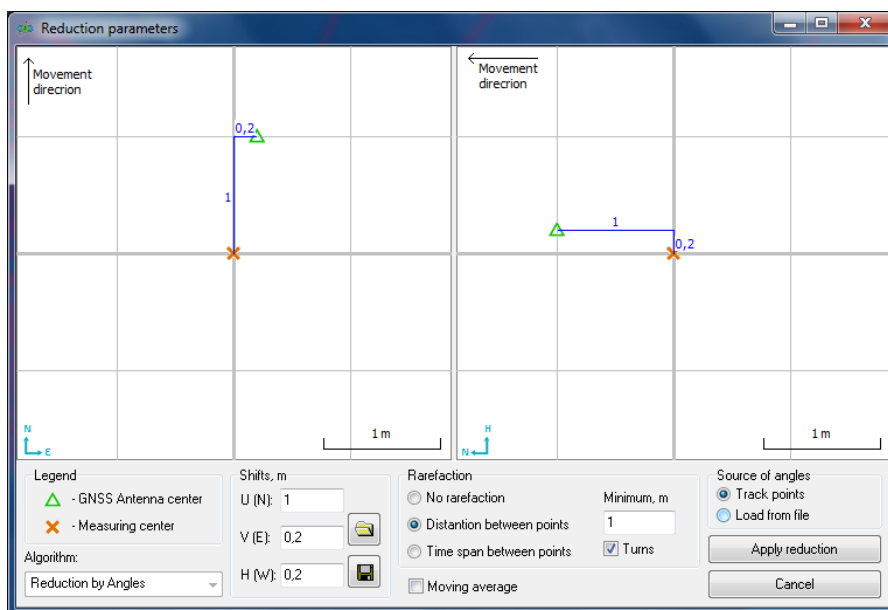


Рис. 6. Настройка алгоритма редукции в RouteEditor

Результат выводится в виде дополнительной траектории, для которой можно определить исходные точки (рис. 7).

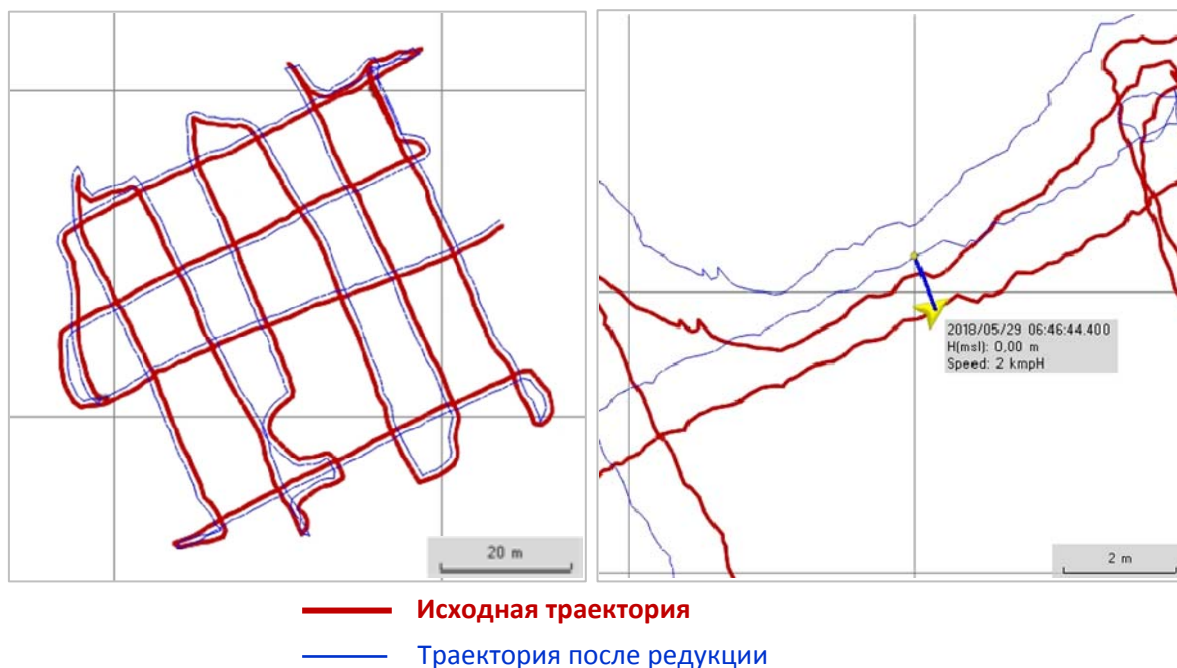


Рис. 7. Результаты редукции в RouteEditor

Таким образом, применение указанных методов редукции позволяет автоматизировано выполнять переход от координат и высот точек траектории ГНСС-антенны к соответственным точкам приемных антенн комплекса ЭМС при минимальных затратах на дополнительное оборудование.

Это, в свою очередь, позволяет выдерживать инструктивные точности и повышает качество обработки и интерпретации геофизических данных.

В дальнейшем планируется дополнение системы датчиками ИНС, что должно позволить получать поправки редукции по строгим формулам (2), и, как следствие, дополнительно повысить точность редукции.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Проблемы геодезического обеспечения электромагнитного сканирования / К. И. Мамлютина, С. О. Шевчук, Н. С. Косарев, К. В. Киселев // Интерэкспо ГЕО-Сибирь. XIV Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия» : сб. материалов (Новосибирск, 23–27 апреля 2018 г.). – Новосибирск : СГУГиТ, 2018. – С. 285–292.
2. Тригубович Г. М. Инновационные поисково-оценочные технологии электроразведки становлением поля воздушного и наземного базирования // Разведка и охрана недр. – 2007. – № 8. – С. 80–87.
3. Инструкция по топографо-геодезическому и навигационному обеспечению геологоразведочных работ. – Новосибирск : СНИИГГиМС, 1997. – 106 с.

4. GPS-технология геодезического обеспечения геологоразведочных работ: Методические рекомендации / А. Г. Прихода, А. П. Лапко, Г. И. Мальцев, И. А. Бунцев / науч. ред. А. Г. Прихода. – Новосибирск: СНИИГГиМС, 2008. – 274 с.
5. Антонович К. М. Использование спутниковых радионавигационных систем в геодезии : монография. В 2 т. Т. 2. – М. : Картгеоцентр, 2006. – 360 с.
6. Hofmann-Wellenhof, B. GNSS – Global Navigation Satellite Systems GPS, GLONASS, Galileo and more / B. Hofmann-Wellenhof, H. Lichtenegger, E. Wasle – Wien, New-York: Springer. – 2008. – 516 p. – Англ.
7. Влияние многопутности на результаты геодезического обеспечения электромагнитного сканирования / С. О. Шевчук, Н. С. Косарев, К. И. Малютина, К. В. Киселев, В. М. Жидов // Интерэкспо ГЕО-Сибирь. XIV Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия» : сб. материалов (Новосибирск, 23–27 апреля 2018 г.). – Новосибирск : СГУГиТ, 2018. – С. 293–298.
8. Шевчук С. О. Опыт геодезического обеспечения электромагнитного сканирования отечественной ГНСС-аппаратурой при геофизических работах / С. О. Шевчук, К. В. Киселев, Д. А. Прохоров // Геопрофи. – 2018. – № 6. – С. 40–45.
9. Kamenetsky, F. M. Transient Geo-Electromagnetics / F. M. Kamenetsky, E. H. Stettler, G. M. Trigubovich – Англ. – Ludwig-Maximilian-University of Munich. Dept. of the Earth and Environmental Sciences. Section Geophysics. – Munich, 2010. – 296 с.
10. FIS1100 Datasheet [Электронный ресурс] Firechild Semiconductors. – Режим доступа: <https://www.fairchildsemi.com/datasheets/FI/FIS1100.pdf>.
11. Шевчук С. О., Косарев Н. С. Алгоритм определения пространственных углов аэрогеофизической платформы // Вестник СГГА. – 2013. – Вып. 4 (24). – С. 37–47.
12. Шевчук С. О., Барсуков С. В. Навигационное сопровождение аэрогеофизических исследований с использованием программы RouteNav // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2017. XIII Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 17–21 апреля 2017 г.). – Новосибирск : СГУГиТ, 2017. Т. 2. – Новосибирск : СГУГиТ, 2017. – С. 130–137.
13. Шевчук С. О., Никитин В. Н., Барсуков С. В. Выполнение навигационного обеспечения наземных и аэрогеофизических работ с использованием современного программно-аппаратного обеспечения // Интерэкспо ГЕО-Сибирь. XIV Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия» : сб. материалов (Новосибирск, 23–27 апреля 2018 г.). – Новосибирск : СГУГиТ, 2018. – С. 266–275.
14. Шевчук С. О. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2017614500 / Российская Федерация / Программа для навигационного обеспечения аэрогеофизических работ RouteNav [Текст] / С. О. Шевчук, С. В. Барсуков; заявитель и правообладатель Закрытое акционерное общество «Аэрогеофизическая разведка» (RU); дата поступления 09 янв. 2017 г.; дата регистрации 18 апр. 2017 г.

© С. О. Шевчук, В. Н. Никитин, Н. С. Косарев, А. В. Куклин, К. В. Киселев, 2019